

¿Cómo citar?

Hernández-Salón, S., Solano Montero, S., Rojas Hernández, A., Hernández Calderón, A. y Oporta Oporta, A. (2024). Cianobacterias y microalgas: Potencial para la salud, la agricultura y el medio ambiente con un vistazo a la investigación en Costa Rica. *Revista Innovación Universitaria*, 7, 70-117. <https://doi.org/10.64312/9djmqx11>

CIANOBACTERIAS Y MICROALGAS: POTENCIAL PARA LA SALUD, LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE CON UN VISTAZO A LA INVESTIGACIÓN EN COSTA RICA

CYANOBACTERIA AND MICROALGAE: POTENTIAL FOR HEALTH, AGRICULTURE, AND THE ENVIRONMENT WITH A GLIMPSE INTO RESEARCH IN COSTA RICA

DOI: <https://doi.org/10.64312/9djmqx11>

Sandra Liliana Hernández-Salón

sandrasalon2000@gmail.com

Universidad Internacional de las Américas

<https://orcid.org/0000-0001-6049-1639>

Bióloga, Licenciada en Genética Humana y Máster en Ciencias Biomédicas

Costa Rica

Sebastián Solano Montero

sebassolano2000@gmail.com

Estudiante de Farmacia, Universidad Internacional de las Américas

<https://orcid.org/0009-0009-3751-9539>

Bachiller en química, UCR

Costa Rica

Ana Patricia Rojas Hernández

aprojash@edu.uia.ac.cr

Estudiante de Farmacia, Universidad Internacional de las Américas

<https://orcid.org/0009-0003-2750-9229>

Costa Rica

Adriana Carolina Hernández Calderón

achernandezc@edu.uia.ac.cr

Estudiante de Farmacia, Universidad Internacional de las Américas

<https://orcid.org/0009-0004-9526-9420>

Costa Rica

Anielka Oporta Oporta

anoportao_far@uia.ac.cr

Estudiante de Farmacia, Universidad Internacional de las Américas

<https://orcid.org/0009-0005-4200-4813>

Costa Rica

Recepción: 29-04-2025

Aceptación: 17-08-2025

RESUMEN

El objetivo de esta revisión narrativa exploratoria es exponer la relevancia de las cianobacterias y microalgas, organismos con notable diversidad metabólica y adaptabilidad ecológica, capaces de producir metabolitos con propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antivirales, antiinflamatorias, fotoprotectoras y antitumorales, además de aportar soluciones en biotecnología ambiental. La metodología se aplicó de la siguiente forma: se realizó una búsqueda exploratoria en bases académicas (2015–2025), sin criterios sistemáticos, organizando los hallazgos en áreas temáticas y contextualizándolos con investigaciones desarrolladas en Costa Rica. Los resultados indican que, en salud, compuestos como ficocianina, cianovirina-N, dolastatina 10 y fucoxantina se evalúan en terapias contra cáncer, VIH, virus emergentes y enfermedades inflamatorias; en cosmética, polisacáridos y MAAs muestran efectos hidratantes, antienvejecimiento y fotoprotectores; en nanotecnología farmacéutica, diversos metabolitos funcionan como nano transportadores que optimizan biodisponibilidad y especificidad de fármacos. En agricultura, actúan como biofertilizantes, bio estimulantes y agentes de bio control, mejorando rendimiento, calidad nutricional y reduciendo agroquímicos. En el ámbito ambiental, destacan por bio remediar metales pesados, micro plásticos, antibióticos y otros contaminantes, además de capturar carbono y posibilitar la producción de biocombustibles, alineándose con la economía circular. Se concluye que, en Costa Rica, laboratorios de la UNA, UCR y TEC investigan especies locales con fines industriales, terapéuticos y ecológicos. Estos microorganismos constituyen una alternativa estratégica ante desafíos sanitarios, agrícolas y ambientales; no obstante, se requiere avanzar en regulación, estandarización, escalabilidad y evaluación toxicológica para su implementación efectiva.

PALABRAS CLAVE: Cianobacterias, microalgas, biotecnología ambiental, aplicaciones en salud, biofertilizantes.

ABSTRACT

The objective of this exploratory narrative review is to highlight the relevance of cyanobacteria and microalgae which possess remarkable metabolic diversity and ecological adaptability and can produce metabolites with antioxidant, antimicrobial, antiviral, anti-inflammatory, photoprotective, and antitumor properties, in addition to offering solutions in environmental biotechnology. Methodology was based on an exploratory search that was conducted in academic databases covering the period from 2015 to 2025, using non-systematic criteria. The findings were organized into thematic areas and contextualized using research conducted in Costa Rica. Results indicate that in the health sector, compounds such as phycocyanin, cyanovirin-N, dolastatin 10, and fucoxanthin are being evaluated as potential therapies against cancer, HIV, emerging viruses, and inflammatory diseases. In cosmetics, polysaccharides and mycosporine-like amino acids (MAAs) exhibit moisturizing, anti-aging, and photoprotective effects. In pharmaceutical nanotechnology, various metabolites function as nanocarriers, enhancing drug bioavailability and specificity. In agriculture, they function as biofertilizers, bio stimulants, and biocontrol agents, improving yield, enhancing nutritional quality, and reducing agrochemical use. In the environmental field, they are effective in bioremediation of heavy metals, microplastics, antibiotics, and other pollutants, as well as in carbon capture and biofuel production, aligning with circular economy principles. It is concluded that in Costa Rica, laboratories at UNA, UCR, and TEC are actively researching local species for industrial, therapeutic, and ecological purposes. These microorganisms represent a strategic alternative to address health, agricultural, and environmental challenges; however, further progress is needed in regulation, standardization, scalability, and toxicological evaluation to enable effective implementation.

KEYWORDS: Cyanobacteria, microalgae, environmental biotechnology, health applications, biofertilizer.

INTRODUCCIÓN

Las cianobacterias representan uno de los grupos más antiguos y versátiles de organismos fotosintéticos en la Tierra, con un origen que se remonta a más de 3.5 mil millones de años. Junto

con las microalgas, son conocidas como algas verde azules. La notable adaptabilidad de las cianobacterias les ha permitido colonizar una diversidad de hábitats, desde ambientes marinos y de agua dulce hasta entornos extremos como desiertos, fuentes termales y regiones polares. Esta capacidad de supervivencia en condiciones adversas se debe en gran medida a su plasticidad morfológica y metabólica, la cual se manifiesta en una gran diversidad estructural: pueden presentarse en formas unicelulares, coloniales o filamentosas. (Matsuo et al., 2025; Wang & Luo, 2025).

Entre las cianobacterias más representativas destacan los géneros *Atrhrospira* sp. (*Spirulina* sp.), *Anabaena* sp., *Nostoc* sp., *Chlorella* sp. La *Spirulina* sp. es ampliamente reconocida por su alto contenido de ficocianina, un pigmento con propiedades antioxidantes y antinflamatorias (Husain et al., 2024; Rodrigues et al., 2024). *Anabaena* sp. es conocida por la producción de aminoácido tipo micosporina (MAAs), con capacidad fotoprotectora (Suárez-Bernal, 2023). *Nostoc* sp. produce moléculas con actividad citotóxica (Bitsch et al., 2025). Por su parte, *Chlorella* sp. produce ácido eicosapentaenoico (EPA) un compuesto con actividad antiviral (Ilieva et al., 2024). Además, posee una notable capacidad para remover hidrocarburos y metales pesados, lo que lo convierte un instrumento en biorremediación. (Abbas et al., 2025; Tian et al., 2025).

Esta diversidad de géneros no solo refleja su amplia distribución ecológica, sino su notable capacidad biosintética. Además, esta adaptabilidad está estrechamente relacionada con su habilidad para sintetizar una amplia gama de metabolitos secundarios, muchos de los cuales poseen propiedades bioactivas de interés farmacológico y biotecnológico. Diversas investigaciones han identificado más de 1600 metabolitos derivados de cianobacterias, incluyendo péptidos cíclicos, depsipeptídos, poliquétidos, alcaloides, lipopeptidos y compuestos fenólicos, entre otros. Algunos de estos metabolitos han demostrado efectos anticancerígenos, antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos y antivirales de alto valor clínico. (Robles-Bañuelos et al., 2022).

Por ejemplo, toxinas como la dolastatina 10, el cryptophycin y la curacina A han sido evaluados exitosamente en estudios preclínicos y clínicos, mostrando actividad citotóxica potente contra diversas líneas celulares tumorales. Entre los metabolitos de mayor relevancia destacan los pigmentos tetrapirróticos, como las ficobiliproteínas (ficocianina, aloficocianina y ficoeritrina), los

cuales poseen propiedades antioxidantes notables vinculados con efectos inmunomoduladores, hepato protectores y neuro protectores. (Bishoyi et al., 2023; Cock & Cheesman, 2023; Khalifa et al., 2021; Qamar et al., 2021; Singh et al., 2022)

Estas estructuras tetra pirrólicas, además de desempeñar un papel esencial en la fotosíntesis, han demostrado ser una alternativa prometedora a los colorantes sintéticos en las industrias alimentaria y cosmética debido a su alta solubilidad en agua y baja toxicidad. (Qamar et al., 2021).

En este contexto, las microalgas se están consolidando como un recurso biotecnológico valioso para estos sectores, gracias a su riqueza en metabolitos bioactivos como carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados, polisacáridos sulfatados, ficoliproteínas y vitaminas del complejo B, C y E. Estas biomoléculas no solo ofrecen coloración natural, sino que además poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y fotoprotectoras, lo que las hace altamente atractivas para el desarrollo de productos funcionales, nutracéuticos y dermatológicamente efectivos. (Osathanunkul et al., 2025; Williamson et al., 2024).

Por otro lado, avances recientes en nanotecnología han permitido explorar la aplicación de compuestos ciano bacterianos, como nano vectores, para la administración dirigida de fármacos. El uso de pigmentos, polisacáridos y lípidos de cianobacterias en formulaciones nanoestructuradas ha demostrado mejorar la biodisponibilidad, estabilidad y especificidad terapéutica de agentes anticancerígenos, lo que abre nuevas vías en la medicina personalizada. (Singh et al., 2022).

Sobre las microalgas, estás, al igual que las cianobacterias, cuentan con una gran diversidad de metabolitos secundarios, con usos potenciales en el área de la salud. Además de sus aplicaciones en este campo, en estética y en alimentación, también tiene amplios usos en la agricultura y en estrategias de conservación ambiental. Este interés en la agricultura y la conservación ha cobrado creciente interés en las últimas décadas, debido a su versatilidad biotecnológica, alta productividad y capacidad de adaptación a diversas condiciones ecológicas. (da Gama et al., 2025). Es por ello que tres de las universidades estatales de Costa Rica han desarrollado

programas de investigación en estas líneas. (CIB, s.f.; LABOMIC, s.f.; LABMA, s.f.; Osathanunkul et al., 2025).

Debido al amplio potencial de las microalgas y cianobacterias en áreas como la medicina, la agricultura, la cosmética, la alimentación y la biorremediación, resulta fundamental comprender tanto sus propiedades bioquímicas como sus aplicaciones tecnológicas actuales. Este artículo tiene como objetivo identificar sus aplicaciones actuales y potenciales en los sectores de la salud, la agricultura y el medio ambiente. De este modo, se busca destacar el valor estratégico de estas especies como recurso biotecnológico clave para el desarrollo sostenible y la innovación científica en contextos tanto locales como globales.

MÉTODOS

Este artículo se basa en una revisión narrativa exploratoria orientada a identificar y analizar información científica relevante sobre los usos actuales y potenciales de las microalgas y cianobacterias en salud, agricultura, medio ambiente y biotecnología. No se siguieron criterios de revisión sistemática ni filtros rigurosos de inclusión/exclusión. Se consultaron bases de datos académicas como PubMed, ScienceDirect y Google Scholar, utilizando términos clave en español e inglés. Entre las palabras clave empleadas se incluyeron: "cianobacterias", "microalgas", "compuestos bioactivos", "biotecnología", "aplicaciones de microalgas", "aplicaciones de cianobacterias", "microalgas en agricultura", "cianobacterias en salud", "microalgas en salud", "biorremediación", "microalgas en dermocosmética", "estudio de cianobacterias en Costa Rica", "estudio de microalgas en Costa Rica", entre otras.

Para conocer sobre los proyectos de investigación desarrollados por las universidades estatales de Costa Rica (UNA, UCR y TEC), se revisó la información publicada en las páginas web de cada uno de los laboratorios.

Se establecieron los siguientes criterios de inclusión:

- Publicaciones en español e inglés.
- Artículos científicos originales y revisiones, así como capítulos de libro publicados entre 2015 y 2025, priorizando aquellos más recientes. Sobre la información generada en Costa

Rica a partir de los proyectos de los laboratorios de microalgas de las Universidades UNA, UCR y TEC, se incluyeron tesis realizadas a partir del año 2010.

- Documentos con enfoque en aplicaciones biomédicas, agrícolas, y ambientales de microalgas o cianobacterias.

Los criterios de exclusión fueron:

- Documentos sin respaldo académico (fuentes no revisadas por pares).
- Estudios centrados exclusivamente en taxonomía.
- Información redundante o desactualizada con respecto a publicaciones más recientes.

La información recolectada fue organizada en cuatro categorías temáticas principales:

- Aplicaciones en salud y farmacología
- Aplicaciones agrícolas
- Aplicaciones ambientales y biorremediación
- Estudios realizados en Costa Rica

Cada categoría fue analizada de forma independiente, permitiendo identificar patrones comunes, metabolitos destacados y especies con mayor potencial. Esta estructura facilitó una presentación clara de los hallazgos y una discusión integral del estado actual del conocimiento.

RESULTADOS

Tabla 1

Metabolitos primarios y secundarios de interés en el área biomédica y ejemplos de microorganismos que los producen

Especie	Tipo	Metabolito	Fuente
<i>Anabaena variabilis</i>	Cianobacteria	Aminoácido tipo micosporina (MAAs)	Suárez-Bernal, et al., 2023
<i>Arthrospira maxima</i>	Cianobacteria	Sulfolípidos	Cirne-Santos et al., 2024
<i>Arthrospira platensis</i> (<i>Spirulina</i>)	Cianobacteria	Polisacáridos con efecto reparador de la barrera cutánea y promotores de colágeno	

		Ficocianina, transportador de nanopartículas en liberación de fármacos Transportador de nanopartículas de quitosano con acetato de bornilo	Chen et al., 2025; Husain et al., 2024
<i>Chlorella sorokiniana</i> , <i>Nannochloropsis limnetica</i> , <i>Tetraselmis suecica</i>	Microalga	Vitamina E (Tococromanoles)	Montoya-Arroyo et al., 2022
<i>Chlorella sp.</i>	Microalga	Ácido eicosapentaenoico (EPA)	Ilieva et al., 2024
<i>Chlorella vulgaris</i>	Microalga	MAAs Polisacáridos con efectos hidratantes y promotores de colágeno	Herrera, et al., 2023
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Tetraselmis chuii</i>	Microalga	Fenoles	Paterson et al., 2024
<i>Chlorophyta sp.</i> , <i>Dunaliella salina</i>	Microalga	Carotenoides	Rodrigues et al., 2024
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Microalga	Astaxantina	Copat et al., 2025
<i>Lyngbya majuscula</i>	Cianobacteria	Hectochlorina	Tan & Salleh, 2024
<i>Lyngbya sp.</i>	Cianobacteria	Depsipéptidos formulados en nanomateriales antimicrobianos y antitumorales	Bishoy et al., 2023
<i>Lyngbya sp</i> , <i>Oscillatoria sp.</i> y <i>Nostoc sp.</i>	Cianobacteria	Péptidos cíclicos, lectinas, depsipéptidos	Bishoy et al., 2023; Cock & Cheesman, 2023
<i>Nostoc sp.</i>	Cianobacteria	Cianovirina-N en nanopartículas liposomales para inhibir entrada del VIH, Criptoficina	Yusupova et al., 2025
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Odontella aurita</i>	Microalga	Fucoxantina	Shangguan et al., 2025
<i>Porphyridium cruentum</i>	Microalga	Polisacáridos sulfatados	Hernández-García et al., 2022
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Microalga	Luteína	Raghul et al., 2024

<i>Schizochytrium sp.</i>	Microalga	DHA para enriquecimiento alimentario infantil	González y Soler, 2024
<i>Scytonema varium</i>	Cianobacteria	Scitovirina	Armario-Najera et al., 2022
<i>Symploca sp.</i>	Cianobacteria	Dolastatina 10	Kallifidas et al., 2024

Tabla 2

Especies de microalgas utilizadas en agricultura y el medio ambiente

Especie	Material	Uso	Fuente
<i>Coelastrella sp.</i>	Extracto de microalga	Bioestimulante	Cruz et al., 2023
<i>Chlorella vulgaris</i>	Biomasa algal	Biorremediación de derrames de petróleo, eliminación de metales pesados y antibióticos	Abbas et al., 2025
<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Aspergillus niger</i>	Consorcio microalga-hongo	Eliminación de microplásticos	Hadiyanto et al., 2025
<i>Desmodesmus subspicatus</i>	Extracto de microalga	Control biológico de hongos patógenos del suelo	Eckstien et al., 2024
<i>Microalgas (diversas)</i>	Biomasa algal	Captura de carbono. Producción de biocombustibles Tratamiento de residuos porcinos y humanos (Economía circular)	Wang et al., 2025
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Biomasa algal	Aprovechamiento de nutrientes de la orina	Nagle et al., 2025

Tabla 3

Estructura de las principales biomoléculas con importancia biomédica y dermocosmética, mencionadas en el texto, ordenadas según su aplicación

Aplicación	Biomolécula	Estructura	Fuente
Antiinflamatorio / Antioxidante	Compuestos fenólicos (un ejemplo naringenina)		Cichoński & Chrzanowsk, 2022
	Ficocianina (un ejemplo de ficobiliproteína)		Saad et al., 2020
	Polisacáridos extracelulares (EPS) y sulfatados		Rigobello & Masini, 2021
	Vitamina E		Rigobello & Masini, 2021
	Astaxantina		Rigobello & Masini, 2021
Antitumoral	Criptoficina		Rigobello & Masini, 2021
	Dolastatina 10		Rigobello & Masini, 2021
	Escitovirina (secuencia de aminoácidos)		Rigobello & Masini, 2021
	Fucoxantina		Rigobello & Masini, 2021

	Luteína		Rigobello & Masini, 2021
	Ácido eicosapentaenoico (EPA)		Rigobello & Masini, 2021
Antiviral (VIH y virus emergentes)	Cianovirina-N (secuencia de aminoácidos)		Mazur-Marzec et al., 2021
	Microvirina (secuencia de aminoácidos)		Mazur-Marzec et al., 2021
	Betacaroteno		Rigobello & Masini, 2021
	Curacina A		Rigobello & Masini, 2021
Fotoprotección, hidratación, antienvejecimiento	MAAs (aminoácidos tipo micosporina) Ejemplo: micosporina-glicina		Saad et al., 2020

Tabla 4

Especies de cianobacterias y microalgas estudiadas en los laboratorios de microalgas, de la Universidad Nacional (UNA), Universidad de Costa Rica (UCR) y del Tecnológico de Costa Rica (TEC)

Laboratorio	Universidad	Cianobacterias	Microalgas	Fuente
LABMA	UNA	<i>Anabaena</i> sp., <i>Athrospira</i> (<i>Spirulina</i>), <i>Trichormus</i>	<i>Chlamydomonas</i> sp., <i>Chlorella</i> sp.	LABMA, s.f.

			<i>Nanofrustulum shiloii, Neochloris sp., Scenedesmus sp.</i>	
LABIOMIC / CIMAR	UCR	<i>Arthrospira platensis, Nostoc sp., Planktothrix isothrix, Synechocystis sp., Phaeodactylum tricornutum, Scenedesmus dimorphus,</i>	<i>Chlamydomonas reinhardtii, Chlorella sorokiniana, Chlorella vulgaris, Nannochloropsis sp.,</i>	LABIOMIC. s. f.
CIB (Lab. Microalgas)	TEC	No hay información disponible	<i>Chlorella vulgaris, Nannochloropsis oculata,</i>	CIB. s. f.

Laboratorio de Biotecnología de Microalgas (LABMA)

Laboratorio de Biotecnología de Microalgas y Cianobacterias (LABIOMIC)

Centro de Investigación en Biotecnología (CIB)

Tabla 5

Proyectos de investigación desarrollados en los laboratorios de microalgas LABMA, en UNA; LABIOMIC, UCR y en CIB, Tecnológico de Costa Rica

	Proyectos de Investigación	Estatus
LABMA	Análisis de pigmentos a partir de microalgas y de cianobacterias con aplicaciones en la industria.	Vigente
LABMA	Medios de cultivo alternativos para el crecimiento de biomasa de microalgas y cianobacterias para su uso en la industria, en la biorremediación, como abono u otras aplicaciones.	Vigente
LABMA	Producción de pigmentos a partir de microalgas en cultivo intensivo en un fotobioreactor tubular helicoidal para la generación de productos de valor agregado para la industria. Vigencia 2018-2021.	Finalizado
LABMA	Caracterización molecular de seis cepas de microalgas y cianobacterias (<i>Spirulina, Trichormus, Nechloris, Chlorella, Scenedesmus</i> y <i>Chlamydomonas</i>) con aplicaciones biotecnológicas. Vigencia 2020-2021.	Finalizado

LABMA	Obtención de biomasa algal a partir de cepas aisladas de estanques productivos y aguas residuales para medir su potencialidad en la producción de biohidrógeno. Vigencia 2016-2018.	Finalizado
LABMA	Alternativas para la optimización del sistema lagunar de tratamiento de aguas residuales del AyA en Cañas, Guanacaste, mediante el análisis integrado del mismo y valoración de su potencial biotecnológico. Vigencia 2016-2019.	Finalizado
LABMA	Conducción de bioelectricidad en dos cepas de cianobacterias de la Algoteca (Laboratorio de Biotecnología de Microalgas, LABMA). Vigencia 2020.	Finalizado
LABMA	Estabilización de una colección de microalgas de un ecosistema acuático artificial y optimización de las condiciones de crecimiento de dichas algas para su posterior uso biotecnológico. Vigencia 2010-2011.	Finalizado
LABIOMIC	Análisis de flujos metabólicos como línea base para ingeniería metabólica de especies de microalgas productoras de aceite.	Vigente
LABIOMIC	Evaluación del potencial biofertilizante de la biomasa de especies de microalgas nativas de Costa Rica.	Vigente
LABIOMIC	Desarrollo de alimentos enriquecidos con biomasa de la cianobacteria <i>Arthrospira</i> (espirulina) que contengan compuestos bioactivos con beneficios potenciales para la salud humana	Vencido
LABIOMIC	Efecto de la mezcla sobre la productividad de la cianobacteria <i>Arthrospira platensis</i> (CEPA BP).	Vigente
LABIOMIC	Efecto de una cianobacteria nativa de Costa Rica, <i>Nostoc</i> sp. como biofertilizante en el crecimiento del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>) y las características del suelo en condiciones de invernadero.	Vigente
LABIOMIC	Evaluación de la contaminación ambiental en los lagos Arenal y Santillal (Guanacaste) y su posible impacto en el riesgo de proliferación cianobacterias productoras de ciano-toxinas que afectan la salud humana en concordancia con el ods 6 de la agenda 2030"	Vigente
LABIOMIC	Evaluación de tres formulaciones a base de cianobacterias como biofertilizante en plántulas de café (<i>Coffea arabica</i>)	Vigente
LABIOMIC	Identificación molecular de microalgas y cianobacterias aisladas en Costa Rica	Vigente

LABIOMIC	Producción biológica de hidrógeno en sustrato de melaza de una microalga (<i>Chlorophyceae</i>) <i>Chlorella vulgaris</i> g-120	Vigente
LABIOMIC	Crecimiento de microalgas basadas en un fotobioreactor vertical iluminado con leds de alta eficiencia.	Vigente
LABIOMIC	Cultivo y uso de la cianobacteria <i>Nostoc sp</i> como potencial biofertilizante y bioestimulante en un cultivo agrícola.	Vigente
LABIOMIC	Establecimiento de un protocolo para la transformación genética de microalgas verdes (<i>Chlorophyceae</i>)	Finalizado
LABIOMIC	Establecimiento de una colección de cepas de microalgas	Finalizado
LABIOMIC	Estudio preliminar sobre la capacidad de remoción de arsénico por <i>Chlorella sp.</i> y <i>Scenedesmus sp.</i> aisladas en Costa Rica	Finalizado
LABIOMIC	Optimización del crecimiento de la cianobacteria <i>Nostoc commune</i> con potencial efecto fitoestimulante.	Finalizado
LABIOMIC	Producción biológica de hidrógeno de una cepa heterotrófica facultativa <i>Chlorella vulgaris</i> en comparación con <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> (microalga mixotrófica).	Finalizado
LABIOMIC	Producción de biomasa microalgal para producción de aceite como eventual fuente energética y de combustible.	Finalizado
LABIOMIC	Selección de cepas de microalgas para la producción de aceite como fuente de biocombustible y otros productos derivados	Finalizado
LABIOMIC	Selección de una cepa de <i>Spirulina sp.</i> con alto contenido de ácido graso poliinsaturado gamma-linolenico (gla, c18:3) como un organismo potencialmente nutracéutico.	Finalizado
LABIOMIC	Ánálisis genético de microalgas y cianobacterias de Costa Rica	Finalizado
CIB	Análisis de flujos metabólicos como línea base para ingeniería metabólica de especies de microalgas productoras de aceite	Vigente
CIB	Evaluación del potencial biofertilizante de la biomasa de especies de microalgas nativas de Costa Rica	Vigente
CIB	Establecimiento de un Modelo de Transferencias de Investigación Contratada en el Cultivo de Mención Tecnológica	Vigente

Laboratorio de Biotecnología de Microalgas (LABMA)

Laboratorio de Biotecnología de Microalgas y Cianobacterias (LABIOMIC)

Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR)

Centro de Investigación en Biotecnología (CIB)

DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta una recopilación de especies de microalgas y cianobacterias junto con los metabolitos secundarios que producen. Diversos estudios han demostrado que estos microorganismos poseen un potencial para diversas aplicaciones en la industria, especialmente en áreas como la salud, agricultura, medio ambiente y energía. Este amplio espectro de usos ha impulsado la investigación hacia metabolitos con propiedades antioxidantes, antitumorales y antiinflamatorios, lo cual está alineado con tendencias mundiales en medicina preventiva y desarrollo sostenible. Dentro de este panorama, destaca particularmente el área de la salud, que concentra una proporción importante de los estudios revisados. Esto se relaciona con la creciente demanda de compuestos naturales con actividades bioactivas, consideradas alternativas terapéuticas seguras, de alto valor agregado y sostenibles (Budzianowska et al., 2025; Durdakova et al., 2024; Ribeiro-Filho et al., 2022). A continuación, se analiza su relevancia y aplicaciones en diversos campos del área biomédica.

Aplicaciones Terapéuticas de los Metabolitos de Cianobacterias y de Microalgas como Antitumorales

En el campo biomédico, la relevancia de los metabolitos producidos por estos microorganismos radica en su potencial terapéutico. Investigaciones recientes han documentado actividades antitumorales, antioxidantes y antiinflamatorias en metabolitos derivados de diversas especies, lo que los convierte en candidatos prometedores para el desarrollo de fármacos (García-Encinas et al., 2025). Esta tendencia no solo responde a la necesidad de nuevas alternativas frente a enfermedades crónicas y degenerativas, sino también a la búsqueda de moléculas con menos efectos secundarios y provenientes de fuentes renovables.

Desde el punto de vista farmacológico, las cianobacterias marinas han cobrado particular atención como una fuente prolífica de compuestos con actividad antitumoral, gracias a sus sistemas biosintéticos complejos que combinan enzimas como las policetido sintetasas (PKS) y las péptido sintetasas no ribosomales (NRPS), que les permite producir metabolitos con estructuras químicas únicas y múltiples mecanismos de acción sobre células cancerígenas (Singh et al., 2022).

Uno de estos compuestos citotóxicos son los dolastatinos, de ellos la dolataina 10, que fue aislado de *Symploca sp.*, inhibe la polimerización de microtúbulos, lo que induce la apoptosis. Este compuesto sirvió como base estructural para desarrollar *brentuximab vedotin*, un conjugado anticuerpo-fármaco aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos, o FDA por sus siglas en inglés, para el tratamiento de linfomas de Hodgkin y de células T. Algunos de estos compuestos han avanzado incluso a ensayos clínicos en fases avanzadas y han sido aprobados por la FDA como parte de terapias antineoplásicas innovadoras. (Chen & Zhang, 2025; Kallifidas et al., 2024). Otro agente que actúa sobre la estabilidad de los microtúbulos es la curacina A, obtenida de la especie *Lyngbya majuscule*. (Hassan et al., 2022).

Otro compuesto producido por cianobacterias cuyo mecanismo de acción es sobre la estabilidad de los microtúbulos, es la toxina criptoficina, producida por especies de *Nostoc*. Una forma de aumentar su actividad antitumoral ha sido uniéndola con el anticuerpo monoclonal Trastuzumab, el cual actúa sobre el receptor HER-2. (Bitsch et al., 2025; Dupré et al., 2023). Otros metabolitos con potente actividad antitumoral son las apratoxinas, de ellas la aprotoxina A, producida por la cianobacteria *Lyngbya majuscule*, la cual actúa contra las células tumorales, en parte inhibiendo la entrada de la proteína HER3 en la vía secretora y con ello se bloquea la vía JAK/STAT3, afectando la proliferación de células cancerosas, particularmente en líneas de cáncer pancreático, colorrectal y de cérvix. (Kazemi et al., 2021; Li et al., 2023; Luesch et al., 2025; Zeng et al., 2023).

Las microalgas también producen moléculas con potencial anticancerígeno, entre ellos la fucoxantina, la astaxantina y el carotenoide luteína. La fucoxantina es producida por diferentes algas, entre ellas las especies *Phaeodactylum tricornutum*, *Odontella aurita*, a través de la inhibición mitocondrial, además aumenta la actividad del medicamento anticáncer cisplatino. (Shangguan et al., 2025).

La astaxantina es producida por diferentes seres vivos, entre ellos la microalga *Haematococcus pluvialis*. Esta molécula ha mostrado una buena actividad tanto preventiva como antitumoral contra cáncer de mama, del sistema nervioso y del sistema digestivo; además, mejora la acción de diversos medicamentos de quimioterapia. (Copat et al., 2025). La luteína es producida por varias especies de microalgas, entre ellas *Scenedesmus almeriensis*; esta molécula actúa sobre la

vía TGF-β/Smad2, reduciendo el crecimiento y movilidad de células cancerosas. (Jawad & Alghanmi, 2025; Raghul et al., 2024).

Metabolitos Secundarios de Cianobacterias y de Microalgas con Actividad Antiviral y Antimicrobianos

En un contexto de creciente resistencia antimicrobiana, las cianobacterias y las microalgas representan una fuente estratégica para el desarrollo de nuevos antibióticos y agentes antivirales. (Cock & Cheesman, 2023). Numerosos estudios han destacado el uso de metabolitos cianobacterianos en la lucha contra patógenos resistentes a múltiples fármacos. Los péptidos cíclicos, lectinas y depsipéptidos derivados de cepas como *Lyngbya* sp., *Oscillatoria* sp., y *Nostoc* sp. han mostrado actividad significativa contra bacterias, hongos, protozoarios y virus, incluyendo cepas de VIH, herpes y citomegalovirus. (Bishoy et al., 2023; Cock & Cheesman, 2023).

Entre los metabolitos cianobacterianos con actividad antiviral destaca cianovirina-N y la scitovirina. La cianovirina-N es producida por especies de *Nostoc* sp.. Es molécula es un tipo de lectina con alta afinidad por los residuos manosa de la glicoproteína gp120 del VIH, que inhibe la entrada del virus en las células huésped. Este compuesto ha sido considerado un candidato prometedor en microbicidas tópicos (Xavier et al., 2024; Yusupova et al., 2025). La scitovirina es producida por *Scytonema varium* y se ha encontrado que tiene actividad contra los virus VIH y el ébola. (Armario-Najera et al., 2022).

Otros metabolitos antivirales son los sulfolípidos, como los de la cianobacteria espirulina (*Arthrospira maxima*), los cuales mostraron una actividad mayor que el medicamento ribavirina (usado como medicamento de referencia en el estudio) contra el virus del Zika. (Cirne-Santos et al., 2024). Otras moléculas antivirales se encuentran en microalgas, entre ellas el ácido eicosapentaenoico (EPA) y los polisacáridos sulfatados; EPA es producido por especies de *Chlorella* sp. (Ilieva et al., 2024). Además de actividad antiviral, las microalgas también producen metabolitos contra las bacterias, como los polisacáridos sulfatados de la especie *Porphyridium cruentum*, los cuales mostraron tener actividad contra *Vibrio harveyi* y *Escherichia coli*. (Hernández-García et al., 2022),

Otra molécula con actividad antibacteriana es la astaxantina, producida por la microalga *Haematococcus pluvialis*, la cual presenta actividad antibacterial produciendo daño en la membrana celular. (Jeon et al., 2025). Sobre moléculas con actividad antifúngica se puede mencionar la hectochlorina, producida por la microalga *Lyngbya majuscula*, la cual ha mostrado actividad contra la levadura *Candida albicans*. (Tan & Salleh, 2024).

Metabolitos Secundarios de Cianobacterias y de Microalgas con Actividad Antioxidantes y Antiinflamatorios

Las ficobiliproteínas, especialmente ficocianina c producida por la cianobacteria *Arthrospira platensis* (*Spirulina platensis*) y carotenoides producidos por especies de microalgas como *Chlorophyta sp* y *Dunaliella salina* son moléculas que pueden capturar especies reactivas de oxígeno (ROS), contribuyendo a prevenir el daño oxidativo relacionado con enfermedades como diabetes, aterosclerosis y procesos neurodegenerativos como el Alzheimer. Además, se ha observado que la ficocianina puede inhibir la expresión de mediadores inflamatorios como COX-2, TNF- α e IL-6, posicionándola como agente antiinflamatorio natural. (Husain et al., 2024; Rodrigues et al., 2024). Otra molécula de gran relevancia que actúa en a través de ROS es el glutatión. Una de las especies que producen esta molécula es *Dunaliella salina*. (Hassanpour, 2024).

Las microalgas *Chlorella vulgaris* y *Tetraselmis chuii* poseen una amplia variedad de fenoles, con actividad antioxidante que podría proteger contra enfermedades intestinales asociados al estrés oxidativo, así como también protección a nivel sistémico. (Paterson et al., 2024). Otra molécula necesaria como antioxidante es la vitamina E (tococromanol), la cual se ha identificado en las microalgas *Chlorella sorokiniana*, *Nannochloropsis limnetica* y *Tetraselmis suecica*. (Montoya-Arroyo et al., 2022).

Otro grupo importante son los aminoácidos tipo micosporina (MAAs), compuestos fotoprotectores que absorben radiación UV entre 310 y 360 nm, lo que les confiere aplicaciones cosméticas y terapéuticas en la protección de la piel y prevención del envejecimiento cutáneo. Estas moléculas son producidas tanto por cianobacterias como *Anabaena variabilis* y microalgas

como *Chlorella vulgaris*. Por lo anterior, se están desarrollando productos como un protector solar a partir de *C. vulgaris* y un protector solar a partir de *A. variabilis*. Además, han mostrado propiedades antiinflamatorias y antioxidantes *in vitro*. (Herrera et al., 2023; Suárez-Bernal, 2023; Urrea-Victoria et al., 2025).

Potencial de los metabolitos de cianobacterias y microalgas en nanotecnología farmacéutica

La biocompatibilidad, biodegradabilidad y estabilidad estructural de muchos metabolitos secundarios producidos por cianobacterias los posiciona como candidatos prometedores para aplicaciones en nanotecnología farmacéutica, particularmente en el diseño de sistemas avanzados de liberación de fármacos. Diversos estudios han demostrado que estos metabolitos pueden incorporarse en nanopartículas con el objetivo de mejorar la biodisponibilidad, selectividad y eficacia terapéutica de compuestos bioactivos en enfermedades crónicas y oncológicas. (Khan et al., 2024; Qamar et al., 2021).

Un ejemplo destacado es el uso de ficobiliproteínas, como la ficocianina y aloficocianina, que han sido exploradas como vehículos transportadores de fármacos debido a su alta solubilidad en agua, baja toxicidad y propiedades antioxidantes. Estas proteínas permiten la conjugación de fármacos anticancerígenos y su dirección hacia tejidos específicos, aprovechando su afinidad por receptores sobre expresados en células tumorales. Un ejemplo es la propuesta del uso de la ficocianina unida al ion manganeso y levamisol para el tratamiento de melanoma cutáneo, mediante la activación con ultrasonido que libera especies reactivas de oxígeno, lo que destruye las células tumorales, y el levamisol activa el sistema inmune, ayudando al cuerpo a reconocer y atacar el tumor. (Khalifa et al., 2021; Qian et al., 2025).

Además, estas moléculas se pueden utilizar para reducir los efectos secundarios de la quimioterapia. Se realizó un ensayo en ratones que estaban recibiendo el quimioterapéutico irinotecan, a los cuales se les administró las moléculas de la cianobacteria *A. platensis* como vehículo para transportar nanopartícula de quitosano cargadas con acetato de bornilo (una sustancia antiinflamatoria); estas moléculas se acumularon en el intestino y redujeron la

inflamación, el estrés oxidativo y protegieron la barrera intestinal de los daños producidos por el irinotecan, mostrando su potencial protector. (Chen et al., 2025).

Por otra parte, los metabolitos cianobacterianos también pueden cargarse en nanopartículas liposomales, poliméricas o a base de sílice, con el fin de proteger los principios activos frente a la degradación prematura y facilitar su liberación controlada en el sitio diana. Por ejemplo, las nanopartículas funcionalizadas con cianovirina-N han mostrado potencial en la inhibición de la entrada del VIH a células huésped y compuestos como los depsipéptidos derivados de *Lyngbya* sp. se han formulado con nanomateriales para potenciar su acción antimicrobiana y antitumoral. (Han et al., 2024; Singh et al., 2022).

Toxicidad, seguridad y retos regulatorios

Aunque muchas especies de cianobacterias producen compuestos tóxicos, como microcistinas, saxitoxinas, anatoxinas y nodularinas, es importante destacar que no todos los metabolitos cianobacterianos poseen una toxicidad significativa. De hecho, una gran proporción de los compuestos aislados ha demostrado perfiles de seguridad aceptables en ensayos preclínicos, especialmente cuando se purifican y se utilizan a dosis terapéuticas. (Qamar et al., 2021; Khalifa et al., 2021).

La caracterización toxicológica rigurosa es fundamental para la evaluación de riesgo-beneficio en aplicaciones médicas. Diversos estudios han demostrado que la toxicidad depende no solo del metabolito en sí, sino también de factores como la cepa productora, las condiciones de cultivo, la dosis administrada y la vía de exposición. Además, algunos metabolitos inicialmente considerados tóxicos han sido aprovechados terapéuticamente, como es el caso de dolastatina 10, un compuesto altamente citotóxico del cual se han derivado fármacos aprobados por la FDA en terapias anticancerígenas. (Cock & Cheesman, 2023; Singh et al., 2022).

Uno de los retos principales en el uso farmacéutico de metabolitos cianobacterianos es la variabilidad en la producción natural de estos compuestos, lo que dificulta su estandarización y escalabilidad industrial. Las condiciones ambientales, la fase de crecimiento del cultivo y la disponibilidad de nutrientes influyen directamente en la expresión de metabolitos secundarios.

Por ello, es necesario desarrollar procesos de cultivo controlados, técnicas de purificación eficientes y métodos analíticos robustos para garantizar la reproducibilidad y seguridad del producto final. (Bishoyi et al., 2023).

En cuanto a los aspectos regulatorios, aunque existen ensayos clínicos en curso para algunos compuestos bioactivos de origen cianobacteriano, muchos de estos enfrentan obstáculos debido a la falta de marcos regulatorios específicos para productos derivados de microorganismos marinos, así como a la complejidad química de algunos metabolitos, lo cual dificulta su síntesis y estandarización. (Khalifa et al., 2021; Saad et al., 2020).

Biomoléculas y su aplicación biomédica y cosmética

La tabla 3 presenta una selección de biomoléculas derivadas de cianobacterias y microalgas organizadas según su aplicación biomédica o cosmética, así como su estructura química, lo cual permite visualizar de manera clara la gran diversidad química y funcional de los metabolitos producidos por estos microorganismos. (Robles-Bañuelos et al., 2022). En el ámbito antioxidante y antiinflamatorio se incluyen compuestos como los fenoles, ficocianina, polisacáridos extracelulares y vitamina E, los cuales han mostrado capacidad para neutralizar ROS, así como inhibir mediadores inflamatorios. Estos compuestos son valiosos tanto en enfermedades crónicas como en productos dermocosméticos. (Rigobello & Masini, 2021; Saad et al., 2020).

En cuanto a moléculas con actividad antitumoral, destacan varias como la dolastatina 10, la criptoficina y la apratoxina A, las cuales fueron aisladas de géneros como *Symploca sp* y *Lyngbya sp*. Estas biomoléculas, muchas de ellas complejas a nivel estructural, han servido como base para la síntesis de moléculas conjugadas anticuerpo-fármaco y representan un avance en quimioterapia dirigida. (Chen & Zhang, 2025; Kallifidas et al., 2024). Sobre las moléculas con actividad antiviral, destacan las lectinas como la cianovirina-N y la microvirina, con afinidad por glicoproteínas virales, como VIH. (Mazur-Marzec et al., 2021).

Finalmente, se destacan biomoléculas como MAAs en foto protección, hidratación y prevención del envejecimiento cutáneo, lo cual ha motivado el desarrollo de formulaciones cosméticas naturales. (Saad et al., 2020; Suárez-Bernal, 2023). En conjunto, esta tabla evidencia que las

cianobacterias y microalgas no solo representan una fuente de compuestos con funciones farmacológicas, sino que también pueden ser utilizadas como ingredientes también en la industria cosmética y alimenticia.

Uso de microalgas en cosmética y alimentación

Como se mencionó anteriormente en la sección de antioxidantes y antiinflamatorios, los aminoácidos tipo micosporina (MAAs, por sus siglas en inglés) son compuestos de bajo peso molecular con una elevada capacidad de absorción en el espectro ultravioleta (310–360 nm), lo que les confiere un papel fotoprotector crucial en ambientes expuestos a radiación solar intensa. Su uso se extiende a formulaciones cosméticas como protectores solares naturales, con actividades antioxidantes y antiinflamatorias adicionales. (Herrera et al., 2023; Suárez-Bernal; Urrea-Victoria et al., 2025).

Aprovechando estas propiedades y su riqueza en compuestos bioactivos como carotenoides, ácidos grasos esenciales y polisacáridos, el sector cosmético y de nutrición funcional también ha mostrado un crecimiento significativo en la incorporación de extractos de microalgas. Esta tendencia hacia ingredientes naturales y sostenibles responde al interés del consumidor por productos más saludables y que disminuyan el impacto sobre el medio ambiente (Durdakova et al., 2024; García-Encinas et al., 2025; Saad et al., 2020; Suárez-Bernal, 2023).

Especies de microalgas como *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* y *Haematococcus pluvialis* son ampliamente utilizadas en formulaciones para el cuidado de la piel. El extracto de *Haematococcus pluvialis*, rico en astaxantina, ha demostrado una alta capacidad antioxidante y fotoprotectora, contribuyendo a la prevención del envejecimiento cutáneo inducido por la radiación ultravioleta. Asimismo, los polisacáridos de *Chlorella* sp. y *Arthrospira* sp. han mostrado efectos hidratantes, reparadores de la barrera cutánea y promotores de la síntesis de colágeno. (Cunha et al., 2022; D'Angelo et al., 2024; Havas et al., 2022; Poorniammal et al., 2025).

Otra especie con potencial para el cuidado de la piel es *Phaeodactylum tricornutum*. Las vesículas obtenidas de esta especie pueden ayudar a proteger y recuperar la piel del daño por estrés oxidativo y la radiación ultravioleta. (Xu et al., 2025). Otro problema que enfrenta la piel son las

infecciones por bacterias multirresistentes a antibióticos, para este problema se ha encontrado que los extractos de cianobacterias encontradas en el Archipiélago de Cabo Verde han demostrado tener capacidad para tratar este tipo de infecciones cutáneas. (Morone et al., 2025).

En el sector alimentario, las cianobacterias y microalgas son valoradas como ingredientes funcionales por su alto contenido proteico (hasta un 60% en *Arthrospira sp*), así como por su perfil de aminoácidos esenciales y lípidos saludables, especialmente omega-3. Además, su capacidad de biosíntesis de pigmentos naturales (como ficocianina y β-caroteno) las convierte en aditivos alimentarios naturales con potencial antioxidante y colorante. (Durdakova et al., 2024; García-Encinas et al., 2025). En este sentido autores como González y Soler, (2024) han propuesto el enriquecimiento de la leche infantil con *Arthrospira sp.* y *Schizochytrium sp.* por tener altas concentraciones de DHA, fundamental para el desarrollo del cerebro y la vista, además funcionan como coadyuvantes del microbiota intestinal.

El aprovechamiento de las microalgas en estos sectores no solo responde a la demanda de productos naturales y sostenibles, sino que también representa una estrategia alineada con los principios de la economía circular y la biotecnología verde. No obstante, persisten desafíos relacionados con la estandarización de cultivos, la eficiencia de los procesos de extracción y la regulación sanitaria, los cuales deben ser abordados mediante investigación interdisciplinaria. (Sarker & Kaparaju, 2024).

Las microalgas en la agricultura y el medio ambiente

La tabla 2 presenta una recopilación de especies de microalgas que tienen beneficios para la agricultura y para el mejoramiento del medio ambiente. A continuación, se analizan las características de las cianobacterias y las microalgas que permiten su uso en estas áreas, así como las especies que se utilizan en diferentes procesos.

En el contexto ecológico, se ha observado que las cianobacterias también forman simbiosis beneficiosas con esponjas marinas, líquenes, macroalgas y otros organismos, contribuyendo a ciclos biogeoquímicos clave como la fijación de nitrógeno y carbono. Estas asociaciones también

favorecen la producción de metabolitos defensivos especializados que ofrecen protección frente a predadores y estrés. (Mutalipassi et al., 2021).

Perspectivas en agricultura sostenible

Más allá del ámbito de la salud, la agricultura es otro sector estratégico para la aplicación de microalgas y cianobacterias, principalmente como biofertilizantes, bioestimulantes y agentes de control biológico. Estas aplicaciones permiten reducir la dependencia de agroquímicos, mejorar la calidad del suelo y promover una agricultura más sostenible, una tendencia alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Yapa et al., 2022). Este interés global también se refleja en Costa Rica, mediante proyectos como el cultivo de *Nostoc muscorum* como bioestimulante en plantas de lechuga bajo condiciones de invernadero, actualmente en desarrollo en LABIOMIC (ver Anexo 2). Esta iniciativa evidencia el compromiso nacional con tecnologías que favorecen la producción limpia.

Esta es una excelente alternativa al uso de fertilizantes, ya que contribuye al incremento de nutrientes en el suelo, mejorando la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio. Su uso reduce la dependencia de fertilizantes químicos, disminuyendo así el impacto ambiental derivado de la agricultura intensiva. Un estudio mostró que, en cultivo de tomate, utilizando abono con un 75% de microalgas, se aumentó el grosor del tallo, la altura y la cosecha en 0,63 Kg por planta; además, aumentó significativamente el contenido de azúcares, proteínas, vitamina C y licopeno en los frutos, y redujo los niveles de nitrato. (Li et al., 2024).

De forma análoga al uso de *N. muscorum* como bioestimulantes en plantas de lechuga, las microalgas también se emplean como bio estimulantes que promueven la germinación de semillas, el desarrollo radicular y la resistencia a condiciones de estrés abiótico como la sequía, la salinidad y temperaturas extremas. Este efecto se atribuye a la presencia de fitohormonas naturales, aminoácidos y polisacáridos presentes en los extractos algales. Un estudio evaluó el efecto de los extractos de varias especies de microalgas como abono foliar en la fresa variedad 'Alba'; de ellas, la microalga *Coelastrella* sp. produjo un aumento de más del 25% en el

rendimiento. Además, los frutos presentaron más del 10% de aumento en azúcares y metabolitos secundarios beneficiosos para la salud. (Cruz et al., 2023; Žunić et al., 2024).

Por otro lado, ciertas microalgas y cianobacterias poseen propiedades antimicrobianas y alelopáticas, por ello se pueden utilizar para el control biológico de patógenos del suelo, hongos fitopatógenos y nemátodos. Esto permite reducir el uso de pesticidas químicos, lo cual es crucial para prácticas agrícolas más limpias y sostenibles. Un estudio mostró que muchas de las 59 especies de microalgas evaluadas para actividad antifúngica contra ocho patógenos del suelo inhibieron de forma significativa su crecimiento, siendo la especie *Desmodesmus subspicatus* la que tuvo mayor actividad antifúngica. (Eckstien et al., 2024).

Impacto ambiental y servicios ecosistémicos

Desde una perspectiva ambiental, las microalgas también han demostrado una alta eficacia en procesos de biorremediación. Uno de los contaminantes dañinos en el medio ambiente, son los derrames de petróleo, los cuales dañan los ecosistemas acuáticos, una solución es su remoción mediante algas, siendo la especie *Chlorella vulgaris* una de las mejores opciones para este fin. (Abbas et al., 2025). Estas algas también son capaces de eliminar los metales pesados. Actualmente se desarrollan diferentes procedimientos para este fin, entre ellos el uso de microalgas combinado con un campo eléctrico demostró la eliminación de un 85.5% de cobre, un 97.7% de zinc y un 99.1% de cadmio. (Tian et al., 2025)

De la misma forma, las microalgas son capaces de eliminar los restos de antibióticos, los cuales son una de las fuentes de resistencia a antibióticos, un problema de salud pública. (Zachee et al., 2025). Otro problema para la salud humana son los microplásticos, los cuales también se pueden remover utilizando estos organismos fotosintéticos. Un estudio realizado por Hadiyanto et al. (2025), muestran como el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* junto con el hongo *Aspergillus niger* pueden eliminar hasta un 55.7% de polipropileno y un 95% de tereftaleno de polietileno.

Contribuciones al medio ambiente y a la economía circular

En este mismo contexto, la captura de carbono se configura como otra línea estratégica, gracias a que las microalgas fijan CO₂ atmosférico, cuya biomasa puede transformarse en biocombustibles y de esta forma cerrar el ciclo de la energía en una bioeconomía circular (United Nations, s.f.). Laboratorios costarricenses como LABMA y LABIOMIC avanzan en la remoción de arsénico y en el uso de medios de cultivo alternativos, reforzando el vínculo entre biorremediación y desarrollo sostenible (ver Anexo 2). Estas iniciativas alinean el tratamiento de aguas residuales y el aprovechamiento de nutrientes con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con agua limpia y acción climática.

La valorización de residuos biológicos también refleja esta filosofía circular. En el tratamiento de purines de cerdo, las microalgas superan la alta turbidez mediante pretratamientos foto-Fenton solares, mejorando su crecimiento y eficacia en la remoción de contaminantes orgánicos (Ferreira et al., 2025). Respecto a residuos humanos, *Scenedesmus obliquus* se emplea para recuperar nutrientes de la orina, cerrando flujos de nitrógeno y fósforo y reduciendo la contaminación (Nagle et al., 2025).

Finalmente, la integración de microalgas en sistemas de captura de CO₂ mediante membranas de polisulfona recubiertas con anhidrasa carbónica y en la producción de biobutanol a través de cepas genéticamente mejoradas abre camino a una sinergia entre mitigación climática y transición energética (Kossalbayev et al., 2025; Wang et al., 2025). Además de la producción de biocombustibles como el bioetanol, otra línea prometedora es la producción de biohidrógeno. El interés por este campo responde al desafío global de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles, en línea con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático (Lochte et al., 2024). En conjunto, estas aplicaciones evidencian el papel clave de las microalgas como motor de servicios ecosistémicos y de una economía circular respetuosa con el medio ambiente.

Estudios Realizados en Costa Rica

A pesar de que la mayoría de los estudios sobre metabolitos de cianobacterias y microalgas se han realizado en Estados Unidos de América, países asiáticos y europeos, los proyectos desarrollados en Costa Rica demuestran una alineación con las tendencias internacionales. Las investigaciones realizadas en los centros de investigación en las universidades estatales, a saber: la Universidad Nacional (UNA) a través de Labma, Universidad de Costa Rica a través del laboratorio de Biotecnología de Microalgas y Cianobacterias (LABOMIC) del Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) a través del Laboratorio de Microalgas del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB), se enfocan en áreas estratégicas como la producción de compuestos bioactivos con aplicaciones terapéuticas, como la ficocianina y el lípido EPA, biofertilizantes, biorremediación y generación de bioenergía. (ver tablas de 4-8). Estos temas coinciden con las líneas globales de investigación, como lo evidencian trabajos recientes en India, China y Brasil. (Rumin et al., 2020; Yuan et al., 2022).

En la tabla 4 se identifican las especies que han sido objeto de estudio durante las últimas décadas en los centros de investigación costarricenses. Un alto porcentaje de ellas proviene de diversos ambientes acuáticos del territorio nacional, lo cual demuestra el aprovechamiento de la biodiversidad local. Muchas de estas especies han mostrado potencial para aplicaciones tanto en el ámbito de la salud como en el ambiental, incluyendo la eliminación de contaminantes, la producción de biomoléculas con actividad antioxidante y su uso como bio estimulantes agrícolas.

En la tabla 5 se presentan los proyectos de investigación desarrollados en dichos laboratorios y en los anexos 1-3, las tesis y artículos derivados de estas investigaciones. (CIB, s.f.; CIMAR, s.f; LABMA, s.f.; Vega et al., 2024). Como se evidencia en este conjunto de tablas, Costa Rica cuenta con un sistema académico y diversos estudios en el estudio de microalgas y cianobacterias, con líneas de investigación que van desde la biotecnología básica hasta aproximaciones con potencial industrial. Los temas que se han priorizado son bioenergía, biofertilizantes, remediación ambiental y producción de compuestos de valor comercial, lo cual se alinea con las prioridades internacionales en biotecnología azul y verde.

Sobre el tema de bioenergía, específicamente la producción de hidrógeno a partir de microalgas, la producción de este combustible en el ámbito internacional aún se encuentra en fases experimentales o piloto, debido a retos técnicos y económicos como la baja eficiencia de conversión, la sensibilidad de las enzimas hidrogenasa al oxígeno y los altos costos operativos de los fotobiorreactores. (Loyte et al., 2024). En este contexto, Costa Rica no está rezagada respecto a estas iniciativas globales, ya que se están realizando diversas investigaciones en este campo, un ejemplo es el proyecto “Producción biológica de hidrógeno en sustrato de melaza de una microalga (*Chlorophyceae*) *Chlorella vulgaris g-120*” que actualmente se lleva a cabo en LABIOMIC, UCR. (Vicerrectoría de Investigación, UCR, sf.).

Sin embargo, en otras áreas, principalmente relacionadas con salud, otros países han alcanzado niveles avanzados de caracterización molecular, ensayos preclínicos y clínicos, así como el desarrollo de formulaciones (incluyendo productos cosméticos, nutracéuticos y nano fármacos con aprobaciones regulatorias iniciales); por ejemplo, ya existen moléculas con potencial anticancerígeno que se encuentran en fase clínica de evaluación, como la astaxantina y la dolastatina 10. Otras moléculas que se encuentran en ensayos clínicos son la critoficina 52, para tratar trastornos neurológicos como esquizofrenia y desórdenes metabólicos como la hipertensión, el polisacárido fitoalexina para tratar la diabetes tipo 2, o la anatoxina-a para tratar esclerosis lateral amiotrófica (ELA), entre otros. (Khalifa, et al., 2021; Masoumi et al., 2025).

Sobre el estudio de biomoléculas aplicadas al área de la salud, la investigación nacional se encuentra en fases iniciales. En este sentido se pueden mencionar las investigaciones “Selección de una cepa de *Spirulina* sp. con alto contenido de ácido graso poliinsaturado gamma-linolenico (gla, c18:3) como un organismo potencialmente nutracéutico”, finalizada en LABIOMIC, y el proyecto “Desarrollo de alimentos enriquecidos con biomasa de la cianobacteria *Arthrospira* (espirulina) que contengan compuestos bioactivos con beneficios potenciales para la salud humana” proyecto actualmente en desarrollo en el mismo laboratorio.

Por otra parte, en el campo de la remoción de contaminantes como metales pesados (Silva-Benavides et al., 2025), se han obtenido resultados prometedores mediante el uso de cepas nativas. Sin embargo, estos estudios aún carecen de estudios comparativos rigurosos frente a

cepas internacionales y optimizadas para esos fines. Esto plantea la necesidad de ampliar el análisis funcional entre especies locales y extranjeras, así como de fortalecer la evaluación toxicológica, el escalamiento biotecnológico y la estandarización de la producción de biomasa.

Un análisis de las Tablas 4 a 8 permite también identificar que las líneas de investigación en Costa Rica se concentran mayoritariamente en pigmentos, biofertilizantes y producción de hidrógeno, con escasa diversificación hacia sectores de alto valor como la nanotecnología, la cosmética o la inmunoterapia, áreas que sí están siendo desarrolladas en Estados Unidos de América, Asia y Europa. (Rumin et al., 2020). Asimismo, no se ha abordado el aprovechamiento en enfermedades crónicas humanas.

Por lo tanto, se hace necesaria una articulación entre los centros académicos, el sector productivo y las entidades reguladoras, con el fin de transformar el conocimiento generado en soluciones biotecnológicas concretas. El potencial científico y biológico en Costa Rica existe, pero su adecuado aprovechamiento dependerá del fortalecimiento institucional, de la inversión en infraestructura para la investigación avanzada y del establecimiento de políticas públicas que favorezcan tanto la innovación como el desarrollo de productos de origen microalgas y cianobacterias en el país y en la región.

Implicaciones y retos para la implementación

Al comparar las aplicaciones reportadas, se observa una asimetría en el desarrollo tecnológico entre sectores. En el ámbito farmacéutico, metabolitos como dolastatina 10, curacina A y astaxantina han alcanzado fases clínicas e incluso aprobaciones regulatorias, lo que demuestra un progreso significativo (Donoso et al., 2021; Singh, 2022; Vujović et al., 2025). En contraste, áreas como la agricultura y la biorremediación se encuentran en etapas experimentales, con escasas experiencias de escalamiento industrial. Este desequilibrio indica que, aunque el potencial es reconocido, la conversión en productos viables sigue siendo limitada.

En cuanto al contexto nacional, Costa Rica muestra avances en líneas como biofertilizantes, pigmentos y bioenergía (ver Tabla 5), lo que la alinea con tendencias globales (Rumin et al., 2020; Yuan et al., 2022). No obstante, persisten desafíos en campos emergentes de alto valor como

nanotecnología farmacéutica y cosmética avanzada, donde otros países han establecido protocolos y normativas específicas. Para cerrar esta brecha, se requiere fortalecer la infraestructura para bioprocesos, estudios toxicológicos y ensayos preclínicos, de manera que la investigación se traduzca en soluciones competitivas y seguras.

Además, el impacto real de estas aplicaciones dependerá de resolver retos clave: estandarización de cultivos, escalabilidad industrial y regulación específica. Sin estos elementos, el conocimiento permanecerá restringido al ámbito académico, sin materializarse en innovaciones de mercado (Ferreira et al., 2025; Hosseinkhani et al., 2022; Mittal & Ranade, 2023). Por último, la versatilidad funcional de estos microorganismos —capaces de actuar como antioxidantes, antivirales, bioestimulantes y agentes de biorremediación— abre la posibilidad de modelos integrados de aprovechamiento, donde converjan salud, agricultura y sostenibilidad ambiental. Este enfoque integral, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, debe orientar las agendas de investigación y desarrollo en Costa Rica, consolidando un camino hacia la innovación con impacto social, económico y ambiental.

CONCLUSIONES

Las microalgas y cianobacterias presentan un enorme potencial para aplicaciones sostenibles en medicina, agricultura, medio ambiente y otras industrias, gracias a su diversidad metabólica y adaptabilidad ecológica. Los metabolitos secundarios producidos por estos organismos, como ficoliproteínas, polisacáridos sulfatados y carotenoides, ofrecen propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antivirales de interés farmacéutico y ecológico.

En la agricultura, su uso como bio fertilizantes, bio estimulantes y agentes de bio control representa una alternativa ecológica y eficaz frente a productos químicos convencionales, promoviendo la sostenibilidad de los sistemas productivos. En el ámbito ambiental, destacan por su capacidad de biorremediación, especialmente en la eliminación de metales pesados, nutrientes en exceso y contaminantes orgánicos en aguas residuales, lo que las convierte en aliadas para el saneamiento hídrico. Pese a su gran potencial, se requiere mayor investigación aplicada y

regulaciones específicas para garantizar su uso seguro, eficiente y económicamente viable a gran escala, tanto en el contexto local como internacional.

Esta revisión constituye un aporte al conocimiento científico y técnico sobre microalgas y cianobacterias, al integrar información que hasta ahora se encontraba fragmentada en diversas disciplinas. La síntesis aquí presentada permite visualizar de forma clara su potencial multifuncional, vinculando los avances científicos internacionales con la investigación desarrollada en Costa Rica.

En el caso de Costa Rica, se evidencia un ecosistema académico que ha iniciado trabajo en bioprospección, cultivo, caracterización y aplicación de especies nativas. Sin embargo, estas iniciativas se encuentran en etapas exploratorias o de validación, lo que indica la necesidad de fortalecer capacidades de escalamiento y transferencia tecnológica.

Finalmente, se recomienda seguir impulsando la investigación orientada al desarrollo de bio insumos agrícolas y sistemas de bio remediación, así como el desarrollo de fármacos naturales y cosméticos verdes adaptados al contexto centroamericano, dando prioridad a la sostenibilidad, la seguridad sanitaria y la economía circular como ejes de implementación.

REFERENCIAS

- Abbas, M., Ni, L., & Du, C. (2025). Using PyCaret to model Chlorella vulgaris's growth response to salinity and oil contamination for crude oil bioremediation. *Environmental Technology*, 46(7), 977-990. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2374027>
- Armario-Najera, V., Blanco-Perera, A., Shenoy, S. R., Sun, Y., Marfil, S., Muñoz-Basagoiti, J., ... & Christou, P. (2022). Physicochemical characterization of the recombinant lectin scytovirin and microbicidal activity of the SD1 domain produced in rice against HIV-1. *Plant Cell Reports*, 41(4), 1013-1023. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02834-5>
- Bishoyi, A. K., Sahoo, C. R., & Padhy, R. N. (2023). Recent progression of cyanobacteria and their pharmaceutical utility: an update. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 41(9), 4219-4252. <https://doi.org/10.1080/07391102.2022.2062051>

Budzianowska, A., Banaś, K., Budzianowski, J., & Kikowska, M. (2025). Antioxidants to defend healthy and youthful skin—current trends and future directions in cosmetology. *Applied Sciences*, 15(5), 2571. 15(5), 1-63. <https://doi.org/10.3390/app15052571>

CIB s.f. <https://www.tec.ac.cr/microalgas>

Bitsch, P., Dessin, C., Bitsch, S., Voss, J., Becker, J., Sharma, P., ... & Kolmar, H. (2025). Evaluation of Potency and Specificity of Cryptophycin-Loaded Antibody-Drug Conjugates. *ChemBioChem*, 26(2), e202400738. <https://doi.org/10.1002/cbic.202400738>

Chen, J., Wang, B., Shen, L., & Huang, Y. (2025). Microalgae-carrying nanomedicine for bioadhesive drug delivery for treating chemotherapy-induced intestinal injury treatment. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 20(2), 101024. <https://doi.org/10.1016/j.japs.2025.101024>

Chen, W., & Zhang, Z. (2025). Recent Advances in Understanding the Clinical Responses of Brentuximab Vedotin in Lymphoma and the Correlation with CD30 Expression. *OncoTargets and Therapy*, 1-14. <https://doi.org/10.2147/OTT.S487088>

CIB, s.f. <https://www.tec.ac.cr/microalgas>

Cirne-Santos, C. C., Barros, C. S., da Silva, A. C. R., Kurpan, D., Oliveira, W. D. S. C., Vasconcellos, B. M., ... & do Valle, A. F. (2024). Arthrospira maxima extract prevents and cures Zika virus infection: in vitro analysis with VERO cells. *Algal Research*, 79, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103479>

Cichoński, J., & Chrzanowski, G. (2022). Microalgae as a source of valuable phenolic compounds and carotenoids. *Molecules*, 27(24), 8852. <https://doi.org/10.3390/molecules27248852>

Cock, I. E., & Cheesman, M. J. (2023). A review of the antimicrobial properties of cyanobacterial natural products. *Molecules*, 28(20), 7127. <https://doi.org/10.3390/molecules28207127>

Copat, C., Favara, C., Tomasello, M. F., Sica, C., Grasso, A., Dominguez, H. G., ... & Ferrante, M. (2025). Astaxanthin in cancer therapy and prevention. *Biomedical Reports*, 22(4), 1-9. <https://doi.org/10.3892/br.2025.1944>

Cruz, C. G., da Rosa, A. P. C., & Costa, J. A. V. (2023). Identification of the phytohormones indole-3-acetic acid and trans-zeatin in microalgae. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(4), 1048-1056. <https://doi.org/10.1002/jctb.7312>

Cunha, S. A., Coscueta, E. R., Nova, P., Silva, J. L., & Pintado, M. M. (2022). Bioactive hydrolysates from Chlorella vulgaris: Optimal process and bioactive properties. *Molecules*, 27(8), 2505. <https://doi.org/10.3390/molecules27082505>

D'Angelo Costa, G. M., & Maia Campos, P. M. B. G. (2024). Development of cosmetic formulations containing olive extract and Spirulina sp.: Stability and clinical efficacy studies. *Cosmetics*, 11(3), 68. <https://doi.org/10.3390/cosmetics11030068>

da Gama, R. C. N., de Siqueira Castro, J., Marangon, B. B., de Jesus Junior, M. M., Ribeiro, V. J., da Silva, J., & Calijuri, M. L. (2025). Microalgae bioinputs as disruptive technology for a sustainable agriculture: a systematic and bibliometric review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 116034. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116034>

Donoso, A., González-Durán, J., Muñoz, A. A., González, P. A., & Agurto-Muñoz, C. (2021). Therapeutic uses of natural astaxanthin: An evidence-based review focused on human clinical trials. *Pharmacological Research*, 166, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105479>

Dupré, C., Hammouda, M. B., Legrand, J., Grizeau, D., Ploux, O., Méjean, A., ... & Michel, S. (2023, October). An ecofriendly process to produce secondary metabolites from Nostoc species; application to the biosynthesis of Cryptophycine within photobioreactors. In *Microbres 2023-18è Congrès National de La SFM*. Revisado en <https://u-paris.hal.science/hal-04237134/>

Durdakova, M., Kolackova, M., Ridoskova, A., Cernei, N., Pavelicova, K., Urbis, P., ... & Huska, D. (2024). Exploring the potential nutritional benefits of Arthrospira maxima and Chlorella vulgaris: A focus on vitamin B12, amino acids, and micronutrients. *Food Chemistry*, 452, 139434 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139434>

Eckstien, D., Maximov, N., Margolis, N., & Raanan, H. (2024). Towards sustainable biocontrol: inhibition of soil borne fungi by microalgae from harsh environments. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1433765. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1433765>

Ferreira, A., Belachqer-El Attar, S., Villaró-Cos, S., Ciardi, M., Soriano-Molina, P., López, J. L. C., ... & Gouveia, L. (2025). Piggery wastewater treatment by solar photo-Fenton coupled with microalgae production. *Water Research*, 271, 122869. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122869>

García-Encinas, J. P., Ruiz-Cruz, S., Juárez, J., Ornelas-Paz, J. D. J., Del Toro-Sánchez, C. L., & Márquez-Ríos, E. (2025). Proteins from Microalgae: Nutritional, Functional and Bioactive Properties. *Foods*, 14(6), 921. <https://doi.org/10.3390/foods14060921>

González, C., & Soler, A. (2024). Infant Nutrition: Breast milk substitutes and gut-brain axis improved by microalgae. *Functional Food Science-Online* ISSN: 2767-3146, 4(12), 479-494. <https://doi.org/10.31989/ffs.v4i12.1447>

Hadiyanto, H., Joelyna, F. A., Khoironi, A., Sudarno, S., Safaat, J. A., Pratama, W. D., & Nur, M. M. A. (2025). Harnessing Chlorella vulgaris-Aspergillus niger Interactions for Effective Microplastic Removal in Aquatic Ecosystems. *Waste and Biomass Valorization*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03062-0>

Hassanpour, H. (2024). ROS regulation in Dunaliella salina by fulvic acid: induction of enzymes related to the ascorbate-glutathione pathway and antioxidant metabolites. *Journal of Applied Phycology*, 36(6), 3231-3241. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03346-3>

Ilieva, Y., Zaharieva, M. M., Kroumov, A. D., & Najdenski, H. (2024). Antimicrobial and Ecological Potential of Chlorellaceae and Scenedesmaceae with a Focus on Wastewater Treatment and Industry. *Fermentation*, 10(7), 341. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070341>

Jawad, H., & Alghanmi, H. (2025). Influence of Two Nutritional Factors (Nitrate and Phosphate) on the Lutein Composition of Coelastrella saipanensis Alga and Estimation of Its Antioxidant Property. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(1), 1933-1944. https://ejabf.journals.ekb.eg/article_410916_55c7d8336c2220a73a069a0711bc84b1.pdf

Jeon, Y. N., Ryu, S. J., Sathiyaseelan, A., & Baek, J. S. (2025). Bioactive Molecules of Microalgae *Haematococcus pluvialis*-Mediated Synthesized Silver Nanoparticles: Antioxidant, Antimicrobial, Antibiofilm, Hemolysis Assay, and Anticancer. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2025(1), 8876478. <https://doi.org/10.1155/bca/8876478>

Hassan, S., Meenatchi, R., Pachillu, K., Bansal, S., Brindangnanam, P., Arockiaraj, J., ... & Selvin, J. (2022). Identification and characterization of the novel bioactive compounds from microalgae and cyanobacteria for pharmaceutical and nutraceutical applications. *Journal of Basic Microbiology*, 62(9), 999-1029. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100477>

Havas, F., Krispin, S., Cohen, M., Loing, E., Farge, M., Suere, T., & Attia-Vigneau, J. (2022). A *Dunaliella salina* extract counteracts skin aging under intense solar irradiation thanks to its antiglycation and anti-inflammatory properties. *Marine Drugs*, 20(2), 104. <https://doi.org/10.3390/md20020104>

Hernández-García. (2022). *Actividad del exopolisacárido sulfatado producido por la microalga Porphyridium cruentum sobre las bacterias Vibrio harveyi y Escherichia coli* [Tesis de maestría], (CICESE, Mexico]. Recuperado junio 2025, de https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3777/1/tesis_Ramiro%20Hern%C3%A1ndez%20Garc%C3%A1A_09%20oct%202022.pdf

Herrera, J. S., Casas, L., & Naranjo, K. (2023). Producción de protector solar a partir de Chlorella vulgaris. *Ingeniería e Innovación*, 11(1). Recuperado junio 2025, de https://www.researchgate.net/profile/Juan-Andres-Sandoval/publication/374053668_Produccion_de_protector_solar_a_partir_de_Chlorella_vulgaris/links/651b741f3ab6cb4ec6b726b3/Produccion-de-protector-solar-a-partir-de-Chlorella-vulgaris.pdf

Hosseinkhani, N., McCauley, J. I., & Ralph, P. J. (2022). Key challenges for the commercial expansion of ingredients from algae into human food products. *Algal Research*, 64, 102696. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102696>

Husain, A., Khanam, A., Alouffi, S., Shahab, U., Alharazi, T., Maarfi, F., ... & Ahmad, S. (2024). C-phycocyanin from cyanobacteria: a therapeutic journey from antioxidant defence to diabetes management and beyond. *Phytochemistry Reviews*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-10045-x>

Kazemi, S., Kawaguchi, S., Badr, C. E., Mattos, D. R., Ruiz-Saenz, A., Serrill, J. D., ... & Ishmael, J. E. (2021). Targeting of HER/ErbB family proteins using broad spectrum Sec61 inhibitors coibamide A and apratoxin A. *Biochemical pharmacology*, 183, 114317. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114317>

Khalifa, S. A., Shedid, E. S., Saied, E. M., Jassbi, A. R., Jamebozorgi, F. H., Rateb, M. E., ... & El-Seedi, H. R. (2021). Cyanobacteria—From the oceans to the potential biotechnological and biomedical applications. *Marine Drugs*, 19(5), 241. <https://doi.org/10.3390/md19050241>

Kallifidas, D., Dhakal, D., Chen, M., Chen, Q. Y., Kokkaliari, S., Colon Rosa, N. A., ... & Luesch, H. (2024). Biosynthesis of Dolastatin 10 in marine cyanobacteria, a prototype for multiple approved cancer drugs. *Organic letters*, 26(7), 1321-1325. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.3c04083>.

Khan, F., Akhlaq, A., Rasool, M. H., & Srinuanpan, S. (2024). *Cyanobacterial Bioactive Compounds: Synthesis, Extraction, and Applications. In Pharmaceutical and Nutraceutical Potential of Cyanobacteria* (pp. 215-243). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45523-0_9

Kossalbayev, B. D., Kakimova, A. B., Sadvakasova, A. K., Bauanova, M. O., Balouch, H., Lyaguta, M. A., ... & Allakhverdiev, S. I. (2025). Strategies for genetic modification of microalgae to improve the production efficiency of liquid biofuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 100, 1301-1314. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.306>

LABIOMIC, s.f. <https://cimar.ucr.ac.cr/modulos-laboratorios-y-areas-de-investigacion-del-cimar/microalgas/>

LABMA, s.f. <https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/laboratorios/labma>

Li, Z., Zhu, X., Wu, Z., Sun, T., & Tong, Y. (2023). Recent advances in cyanotoxin synthesis and applications: a comprehensive review. *Microorganisms*, 11(11), 2636. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112636>

Li, C., Liang, Y., Miao, Q., Ji, X., Duan, P., & Quan, D. (2024). The Influence of Microalgae Fertilizer on Soil Water Conservation and Soil Improvement: Yield and Quality of Potted Tomatoes. *Agronomy*, 14(9), 2102. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092102>

Loyte, A., Suryawanshi, J., Bellala, S. S. K., Marode, R. V., & Devarajan, Y. (2024). Current status and obstacles in the sustainable synthesis of biohydrogen from microalgal species. *Results in Engineering*, 24, 103455. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103455>

Luesch, H., Ellis, E. K., Chen, Q. Y., & Ratnayake, R. (2025). Progress in the discovery and development of anticancer agents from marine cyanobacteria. *Natural Product Reports*. 42(2): 208-56. <https://doi.org/10.1039/d4np00019f>

Masoumi, S., Zokaei, M., Ahmadvand, A., Ghalamkarpoor, N., Asadimanesh, N., Azarimatin, A., ... & Nabi-Afjadi, M. (2025). Microalgae: A Treasure Trove of Anticancer Nutraceuticals and Promising Therapeutic Mechanisms. *Advanced Biomedical Research*, 14(1), 5. https://doi.org/10.4103/abr.abr_101_24

Matsuo, T., Ito-Miwa, K., Hoshino, Y., Fujii, Y. I., Kanno, S., Fujimoto, K. J., & Miyashita, H. (2025). Archaean green-light environments drove the evolution of cyanobacteria's light-harvesting system. *Nature Ecology & Evolution*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02637-3>

Mazur-Marzec, H., Cegłowska, M., Konkel, R., & Pyrć, K. (2021). Antiviral cyanometabolites—A review. *Biomolecules*, 11(3), 474. <https://doi.org/10.3390/biom11030474>

Mittal, R., & Ranade, V. (2023). Bioactives from microalgae: A review on process intensification using hydrodynamic cavitation. *Journal of Applied Phycology*, 35(3), 1129-1161. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02945-w>

Montoya-Arroyo, A., Lehnert, K., Muñoz-González, A., Schmid-Staiger, U., Vetter, W., & Frank, J. (2022). Tocochromanol profiles in Chlorella sorokiniana, Nannochloropsis limnetica and

Tetraselmis suecica confirm the presence of 11'- α -tocomonoenol in cultured microalgae independently of species and origin. *Foods*, 11(3), 396.
<https://doi.org/10.3390/foods11030396>

Morone, J., Hentschke, G. S., Oliveira, I. B., Vasconcelos, V., Martins, R., & Lopes, G. (2025). Secondary metabolites of cyanobacteria from Cape Verde Archipelago act as NO donors with potential application in dermatology and cosmetics. *Algal Research*, 86, 103952.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103952>

Mutalipassi, M., Riccio, G., Mazzella, V., Galasso, C., Somma, E., Chiarore, A., ... & Zupo, V. (2021). Symbioses of cyanobacteria in marine environments: Ecological insights and biotechnological perspectives. *Marine Drugs*, 19(4), 227.
<https://doi.org/10.3390/md19040227>

Nagle, A., Bhadra, S., Nayak, S., Patel, A., & Sevda, S. (2025). Optimizing Scenedesmus obliquus Cultivation for Enhanced Nutrient Recovery from Human Urine in a Circular Economy Framework. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 29(2), 04025005.
<https://doi.org/10.1061/JHTRBP.HZENG-1388>

Osathanunkul, M., Thanaporn, S., Karapetsi, L., Nteve, G. M., Pratsinakis, E., Stefanidou, E., ... & Madesis, P. (2025). Diversity of Bioactive Compounds in Microalgae: Key Classes and Functional Applications. *Marine Drugs*, 23(6), 222. <https://doi.org/10.3390/md23060222>

Paterson, S., Majchrzak, M., Alexandru, D., Di Bella, S., Fernández-Tomé, S., Arranz, E., ... & Hernández-Ledesma, B. (2024). Impact of the biomass pretreatment and simulated gastrointestinal digestion on the digestibility and antioxidant activity of microalgae Chlorella vulgaris and Tetraselmis chuii. *Food Chemistry*, 453, 139686.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139686>

Poorniammal, R., Prabhu, S., Jernisha, J., & Dufossé, L. (2025). Microbial Pigments in Cosmetics and Personal Care. *Microbial Colorants: Chemistry, Biosynthesis and Applications*, 367-384.
<https://doi.org/10.1002/9781394287888.ch16>

Qamar, H., Hussain, K., Soni, A., Khan, A., Hussain, T., & Chénais, B. (2021). Cyanobacteria as natural therapeutics and pharmaceutical potential: Role in antitumor activity and as nanovectors. *Molecules*, 26(1), 247. <https://doi.org/10.3390/molecules26010247>

Qian, C., Wang, H., Bi, J., Zheng, X., Li, R., Luo, H., ... & Cao, J. (2025). A biomimetic manganese-phycocyanin nanodrug-carrying system and its sonodynamic-immunological anti-tumor therapy. *International Journal of Pharmaceutics*, 677, 125626. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125626>

Raghul, E. I., & Aravindan, K. (2024). Chemotherapeutic Effect of Lutein on TGF β /Smad2 Signalling Molecules Gene Expression in Oral Cancer Cells. In Recent Developments in Microbiology, Biotechnology and Pharmaceutical Sciences (pp. 22-24). CRC Press. Recuperado junio 2025, de <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003618140-7/chemotherapeutic-effect-lutein-tgf%CE%B2-smad2-signalling-molecules-gene-expression-oral-cancer-cells-raghul-aravindan>

Rigobello-Masini, M., & Masini, J. C. (2021). Metabolites with beneficial bioactivities and factors affecting their productivity in microalgae and cyanobacteria. *Exploratory Biotechnology Research*, 1(1), 1-21. <https://dx.doi.org/10.47204/EBR.1.1.2021.1-21>

Robles-Bañuelos, B., Durán-Riveroll, L. M., Rangel-López, E., Pérez-López, H. I., & González-Maya, L. (2022). Marine cyanobacteria as sources of lead anticancer compounds: a review of families of metabolites with cytotoxic, antiproliferative, and antineoplastic effects. *Molecules*, 27(15), 4814. <https://doi.org/10.3390/molecules27154814>

Rodrigues, F., Reis, M., Ferreira, L., Grosso, C., Ferraz, R., Vieira, M., ... & Martins, R. (2024). The Neuroprotective Role of Cyanobacteria with Focus on the Anti-Inflammatory and Antioxidant Potential: Current Status and Perspectives. *Molecules*, 29(20), 4799. <https://doi.org/10.3390/molecules29204799>

Ribeiro-Filho, J., Teles, Y. C. F., Igoli, J. O., & Capasso, R. (2022). New trends in natural product research for inflammatory and infectious diseases. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 1-4. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.975079>

- Rumin, J., Nicolau, E., Gonçalves de Oliveira Junior, R., Fuentes-Grünewald, C., Flynn, K. J., & Picot, L. (2020). A bibliometric analysis of microalgae research in the world, Europe, and the European Atlantic area. *Marine drugs*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/md18020079>
- Saad, M. H., El-Fakharany, E. M., Salem, M. S., & Sidkey, N. M. (2020). The use of cyanobacterial metabolites as natural medical and biotechnological tools. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 40(6), 2828-2850. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1838948>
- Sarker, N. K., & Kaparaju, P. (2024). Microalgal Bioeconomy: A Green Economy Approach Towards Achieving Sustainable Development Goals. *Sustainability* (2071-1050), 16(24). <https://doi.org/10.3390/su162411218>
- Shangguan, F., Ma, N., Chen, Y., Zheng, Y., Ma, T., An, J., ... & Yang, H. (2025). Fucoxanthin suppresses pancreatic cancer progression by inducing bioenergetics metabolism crisis and promoting SLC31A1-mediated sensitivity to DDP. *International Journal of Oncology*, 66(4), 31. <https://doi.org/10.3892/ijo.2025.5737>
- Silva-Benavides, A. M., Jiménez-Conejo, N., Solís-Calderón, C., & Barrantes, B. A. (2025). Estudio preliminar sobre la capacidad de remoción de arsénico por las microalgas nativas de Costa Rica Chlorella vulgaris y Scenedesmus dimorphus (Chlorophyceae). *Revista de Biología Tropical*, 73(S1), e64045-e64045. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v73iS1.64045>
- Singh, K. B., Kaushalendra, & Rajan, J. P. (2022). Therapeutic and nutraceutical roles of cyanobacterial tetrapyrrole chromophore: recent advances and future implications. *Frontiers in Microbiology*, 13, 932459. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.932459>
- Suárez-Bernal, D. F., Marroquín-Morales, P., Carrillo-Rosas, S., & Caballero-Cerón, C. (2023). Optimizando la protección solar con Anabaena variabilis: Micospóoras como una alternativa de filtro solar. *Revista de divulgación científica iBIO*, 5(3), HS143-HS143. Junio 2025, Recuperado de <https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/143>

Tan, L. T., & Salleh, N. F. (2024). Marine Cyanobacteria: A Rich Source of Structurally Unique Anti-Infectives for Drug Development. *Molecules*, 29(22), 5307. <https://doi.org/10.3390/molecules29225307>

Tian, X., Wang, M., Liao, X., Chu, S., Cheng, H., Lin, X., & Luo, L. (2025). Removal of single and multi-heavy metals from piggery digestate by the electric field-microalgae system: Influences, kinetics and mechanisms. *Algal Research*, 86, 103934. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103934>

United Nations. (sf.) https://sdgs.un.org/goals?utm_source=chatgpt.com

Urrea-Victoria, V., Hernández, A. R., Castellanos, L., Alves, I. A., & Novoa, D. M. A. (2025). The role of mycosporine-like amino acids in skin care formulations: a patent review (2014–2024). *Photochemical & Photobiological Sciences*, 24, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s43630-025-00717-8>

Vega, F. M., Vargas, M. F., Romero, M. C., Montero, K. M., & Romero, F. V. (2024). Advances in microalgal biotechnology in Costa Rica: contributions from the Costa Rica Institute of Technology. *Tecnología en Marcha*, 37(4), 48-62. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i9.7609>

Vicerrectoría de Investigación.s.f. <https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/researchers/106060101>

Vujović, T., Paradžik, T., Babić Brčić, S., & Piva, R. (2025). Unlocking the therapeutic potential of algae-derived compounds in hematological malignancies. *Cancers*, 17(2), 318. <https://doi.org/10.3390/cancers17020318>

Wang, R. L., Li, M. J., Martin, G. J., & Kentish, S. E. (2025). Enhancing direct air carbon capture into microalgae: A membrane sparger design with carbonic anhydrase integration. *Algal Research*, 85, 103875. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103875>

Wang, S., & Luo, H. (2025). Dating the bacterial tree of life based on ancient symbiosis. *Systematic Biology*, syae071. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syae071>

Williamson, E., Ross, I. L., Wall, B. T., & Hankamer, B. (2024). Microalgae: Potential novel protein for sustainable human nutrition. *Trends in Plant Science*, 29(3), 370-382. Revisado en [https://www.cell.com/trends/plant-science/abstract/S1360-1385\(23\)00268-6](https://www.cell.com/trends/plant-science/abstract/S1360-1385(23)00268-6)

Yuan, R., Pu, J., Wu, D., Wu, Q., Huhe, T., Lei, T., & Chen, Y. (2022). Research priorities and trends on bioenergy: Insights from bibliometric analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15881. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315881>

Xavier, G., de Sousa, A. C. L. F., Dos Santos, L. Q., Aguiar, D., Gonçalves, E., & Siqueira, A. S. (2024). Structural and functional analysis of Cyanovirin-N homologs: Carbohydrate binding affinities and antiviral potential of cyanobacterial peptides. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 129, 108718. <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2024.108718>

Xu, R., Lu, Y., Cai, L., & Zhang, L. (2025). Utilizing Extracellular Vesicles from Phaeodactylum tricornutum as a Novel Approach for Protecting the Skin from Oxidative Damage. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 11(6), 3400-3415. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.4c02346>

Yusupova, A., Kartabayeva, B., Sushchenko, R., Gaysina, K., Renganathan, P., & Gaysina, L. A. (2025). Antifungal Potential of Cyanobacterium Nostoc sp. BCAC 1226 Suspension as a Biocontrol Agent Against Phytopathogenic Fungi and Oomycetes. *Applied Microbiology*, 5(2), 46. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5020046>

Zachee, G., Kayiranga, A., Nizeyimana, J. C., Tian, S., Rugema, J., You, L., ... & Su, J. Q. (2025). Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes using microalgae-based wastewater treatment system: A bibliometric review and mechanism analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 72, 107496. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107496>

Zeng, H., Wang, W., Zhang, L., & Lin, Z. (2024). HER3-targeted therapy: the mechanism of drug resistance and the development of anticancer drugs. *Cancer Drug Resistance*, 7, 14. <https://dx.doi.org/10.20517/cdr.2024.11>

Žunić, V., Hajnal-Jafari, T., Stamenov, D., Djurić, S., Tomić, J., Pešaković, M., ... & Jakopic, J. (2024). Application of microalgae-based biostimulants in sustainable strawberry production.

Journal of Applied Phycology, 36(3), 1219-1231. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03169-8>

ANEXOS

Anexo 1

Publicaciones y tesis realizados en LABMA, Universidad Nacional

PUBLICACIONES
Villalobos, N. 2010. Guía para el curso “Ciencia bajo el microscopio”. Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional.
Villalobos, N. & Scholz, C. 2013. Microalgas en estanques de tilapia y su potencial biotecnológico ambiental e industrial. Revista Biocenosis. 27(1-2), 50-56.
Scholz, C. & Villalobos, N. 2013. Presencia de <i>Chlamydomonas vesterbottnica</i> Skuja en los estanques de la planta de tratamiento de un Relleno Sanitario en Costa Rica. Cuadernos de Investigación. 5(2), 185-187.
Quirós, J., Torres-Salas, I. & Villalobos, N. 2015. La enseñanza de la nutrición a nivel de secundaria utilizando el tema transversal “educación para la salud” desde un enfoque útil para la vida. Revista Educare 19(2), 1-20.
Flores-Stulzer, E., Villalobos, N., Piedra-Castro, L. & Scholz, C. 2017. Evaluación breve de la presencia de diatomeas y su relación con algunos parámetros físico-químicos en el río Pirro, Heredia, Costa Rica. UNICIENCIA 31(2), 99-109.
Villalobos, N. 2017. Biorrefinería fotosintética: uso de microorganismos para una producción amigable con el ambiente. Ambientico 262, 26-30.
Silva-Benavides, A., Campos, M., Villalobos, N., Toulopakis, E. & Torzillo, G. 2019. Growth and hydrogen production by three Chlamydomonas strains cultivated in a commercial fertilizer. International Journal of Hydrogen Energy 44: 9849-9855. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.209
Fuente: Laboratorio de Biotecnología de Microalgas. Publicaciones. https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/publicaciones-labma
TESIS
Campos, Ariana y Naranjo Emilio. 2010. Aprendizaje significativo del contenido: sustancias del protoplasma, incorporando el enfoque Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS), en la Educación Diversificada. Estado: presentado.
Durán, Marilú; Piedra, Miriam; Sáenz M y Mena Esmeralda. 2013. Propuesta para implementar el proyecto Carta de la Tierra en la Enseñanza de las Ciencias en Tercer Ciclo de la Educación General Básica. Estado: presentado.
Mora Marilyn. 2013. Influencia de los modelos de enseñanza utilizados por los docentes de ciencias de sexto grado en el desarrollo de actitudes positivas hacia las ciencias de los estudiantes que ingresan por primera vez a séptimo año en un colegio académico diurno de la Dirección Regional de Alajuela. Estado: presentado.
Herra Miguel. 2013. Comprensión del tema medición de magnitudes físicas para el nivel de séptimo año de la Educación General Básica haciendo uso de equipo básico de laboratorio. Estado: presentado.

Herra Arroyo, Isabel. 2014. Contribución en el Mejoramiento de la Cultura Ambiental en tres grupos de educandos del Centro de Formación Juvenil Zurquí utilizando Principios de Carta de la Tierra. Estado: presentado.
Céspedes Vargas. Edwin. 2014. Análisis taxonómico de las principales especies de diatomeas (Bacillariophyceae) en seis sitios en la cuenca del río Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Estado: presentado.
Ramírez Flores Silvia 2014. Biorremediación de nitrógeno disuelto en un sistema recirculado de agua marina utilizando tapetes microbianos. Estado: presentado.
Parreaguirre, Lourdes y Ramírez, Laura. 2016. Propuesta metodológica basada en la estrategia de laboratorio con el tema de fluidos aplicado en situaciones de la vida cotidiana. Estado: aprobado.
Ortíz Quesada, Alex & Arguedas León, Andrés. 2017. Conocimientos y habilidades que tienen los docentes de la Educación Diversificada de la Dirección Regional de Heredia para enseñar Química con criterios de sostenibilidad desde un Enfoque de Química Verde. Estado: presentado. Con mención de honor <i>Magna Cum Laudem</i> .
Jiménez Loría, Jéssica. 2018. Fitoperifiton y su relación con los contaminantes de origen agrícola en la Laguna Madre de Dios, Limón, Costa Rica, periodo 2015-2018. Estado: recolección de datos.
Villegas, Laura. 2018. Influencia del currículum de secundaria en la percepción que tienen los estudiantes sobre la biotecnología. Estado: presentado.
Benavidez Tercero, Luz. 2018. Cultivo de <i>Neochloris sp.</i> en un fotobiorreactor helicoidal tubular para la producción de carotenoides con capacidad antioxidante. Estado: análisis de datos.
Rodríguez Moreira, Diana. 2018. Aplicación de la cianobacteria fijadora de nitrógeno <i>Trichormus sp.</i> en el crecimiento de culantro (<i>Coriandrum sativum</i>) para su uso como biofertilizante. Estado: análisis de datos.
Villegas, L. 2018. Influencia del currículum de secundaria en la percepción que tienen los estudiantes sobre la biotecnología. Estado: presentado.
Brenes Tortós, Gabriela. 2020. Relación entre la concentración de microcistinas en lagunas de tratamiento de agua residual en Cañas-Guanacaste y la abundancia de cianobacterias. Estado: presentado.
Portugués Solano, Brenda. 2020. Cultivo, escalamiento y análisis de la composición bioquímica de la diatomea <i>Nanofrustulum shiloi</i> (Bacillariophyceae), nativa del noroeste de Baja California Sur, México. Estado: presentado. Con mención de honor <i>Magna Cum Laudem</i> .
Benavidez-Tercero, L. 2022. Cultivo de <i>Neochloris sp.</i> en un fotobiorreactor helicoidal tubular para la producción de carotenoides con capacidad antioxidante. Estado: entregada a comisión.
Leal-Sánchez, A. 2022. Evaluación de la producción de astaxantina en la microalga <i>Haematococcus pluvialis</i> con miras al escalamiento en un fotobiorreactor helicoidal. Estado: entregada a comisión.

Arévalo-Lagos, L. 2022. Producción de ficocianina a partir de la cianobacteria *Spirulina sp*, bajo dos condiciones de estrés, para su evaluación como antioxidante y antibiótico. Estado: escritura del informe.

Zúñiga-Marín, J. 2022. Diseño e implementación de una estrategia didáctica basada en aprendizaje activo para el abordaje de los temas de Fotosíntesis y Respiración Celular en estudiantes del curso de Biología General de la Universidad Nacional, Costa Rica. Estado: entregada a comisión.

Velásquez-Castillo, S. 2022. Producción, Extracción y Cuantificación de Lípidos en Cuatro Microalgas con Potencial Uso Nutricional en Acuicultura. Estado: recolección de datos.

Espinosa-Noguera, D. 2022. Evaluación del potencial fotoprotector de los aminoácidos de tipo micosporina (MAAs) producidos por *Anabaena sp.* para su posible uso como componentes activos en protectores solares. Estado: recolección de datos.

Rodríguez-Moreira, D. 2022. Aplicación de la cianobacteria fijadora de nitrógeno *Trichormus sp.* en el crecimiento de culantro (*Coriandrum sativum*) para su uso como biofertilizante. Estado: análisis de datos.

Fuente: LABMA, s.f. <https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/laboratorios/labma>

Anexo 2

Publicaciones y tesis realizadas en LABOMIC, CIMAR, Universidad de Costa Rica

PUBLICACIONES
Silva-Benavides, A. M., Jiménez-Conejo, N., Solís-Calderón, C., & Barrantes, B. A. (2025). Estudio preliminar sobre la capacidad de remoción de arsénico por las microalgas nativas de Costa Rica <i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Scenedesmus dimorphus</i> (Chlorophyceae). Revista de Biología Tropical, 73(S1), e64045-e64045.
Masojídek, J. et al. (2023). Solar bioreactors for industrial microalgae production. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i> , 107(21), 6439–6458.
Chini-Zittelli, G. et al. (2023). Pigments from microalgae: phycobiliproteins and fucoxanthin. <i>Photochemical & Photobiological Sciences</i> , 2023.
Montoya-Arroyo, A. et al. (2022). α -Tocomonoenol profile in Costa Rican microalgae and cyanobacteria. <i>Journal of Food Composition and Analysis</i> , 107, 104325.
Addis, P. et al. (2022). Light effects on <i>Arthrosphaera</i> composition. <i>Foods</i> , 11, 399.
Zittelli, G. C. et al. (2022). Light spectrum effects on <i>Arthrosphaera platensis</i> growth and pigments. <i>Algal Research</i> , 61, 102583.
Touloupakis, E. et al. (2021). Advances in microalgal hydrogen production. <i>Energies</i> , 14, 7170.
Carneiro, M. et al. (2021). Monitoring lipid accumulation in <i>Nannochloropsis oceanica</i> via chlorophyll fluorescence. <i>Biotechnology and Bioengineering</i> , 118, 4375–4388.
Celis-Plá, P. S. M. et al. (2021). Biomass production of <i>Nostoc calcicola</i> in thin-layer pond. <i>Algal Research</i> , 59, 102421.
Rearte, T. A. et al. (2021). Photosynthesis of <i>Chlorella vulgaris</i> is affected by diurnal oxygen in outdoor cultures. <i>Algal Research</i> , 54, 102176.

Touloupakis, E. et al. (2021). Hydrogen production by <i>Chlorella vulgaris</i> without nutrient starvation. <i>Int. Journal of Hydrogen Energy</i> , 46, 3684–3694.
Babaei, A. et al. (2020). Metabolic shift in <i>Chlorella g120</i> during trophic conversion. <i>Journal of Applied Phycology</i> , 32, 2807–2818.
Vonshak, A. et al. (2020). Photosynthesis of <i>Nannochloropsis spp.</i> and relevance to outdoor cultivation. <i>Journal of Applied Phycology</i> , 32, 909–922.
Silva Benavides, A. M. et al. (2019). Growth and hydrogen production by <i>Chlamydomonas</i> strains with fertilizer. <i>Int. Journal of Hydrogen Energy</i> , 44, 9849–9855.
Campos-Rudin, M. & Silva-Benavides, A. M. (2018). Nutrient removal by microalgae and cyanobacteria from Costa Rica. <i>Revista de Biología Tropical</i> , 66(Suppl. 1), S83–S91.
Silva Benavides, A. M. et al. (2017). Photosynthesis of <i>Arthrospira platensis</i> in cascade vs open pond. <i>Algal Research</i> , 28, 48–56.
Touloupakis, E. et al. (2016). Immobilized <i>Synechocystis sp.</i> PCC 6803 for hydrogen production. <i>Int. Journal of Hydrogen Energy</i> , 41, 15181–15186.
Touloupakis, E. et al. (2016). Hydrogen production by <i>Synechocystis</i> PCC 6803 in outdoor cultures. <i>Algal Research</i> , 18, 78–85.
Silva-Benavides, A. M. (2016). Fertilizer effects on <i>Chlorella sorokiniana</i> . <i>Agronomía Mesoamericana</i> , 27, 265–275.
Touloupakis, E. et al. (2016). Growth of <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803 at high pH and contamination risk. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i> , 100, 1333–1341.
Silva-Benavides, A. M. et al. (2013). Productivity and composition of <i>Phaeodactylum tricornutum</i> in open ponds. <i>Biomass & Bioenergy</i> , 54, 115–122.
Torzillo, G. et al. (2012). Photoacclimation of <i>Phaeodactylum tricornutum</i> in outdoor systems. <i>European Journal of Phycology</i> , 47, 169–181.
Silva-Benavides, A. M. & Torzillo, G. (2012). Nitrogen and phosphorus removal by <i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Planktothrix isothrix</i> . <i>Journal of Applied Phycology</i> , 24, 267–276.
TESIS
Gómez Madriz, A. J. (2021). Evaluación del efecto fertilizante de la cianobacteria <i>Nostoc commune</i> en el desarrollo vegetativo de la lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) VAR. Americana en el cantón de Turrialba.
Zúñiga Vega, M. I. (2022). Uso de la cianobacteria <i>Nostoc muscorum</i> como biofertilizante y sus efectos tanto en el desarrollo del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>) como en las características del suelo en condiciones de invernadero.
Evaluación de dos ambientes productivos de <i>Azolla sp.</i> , en las instalaciones de la empresa Aquafoods en Cañas. Jose Miguel Vega Paniagua. En progreso
Cultivo de <i>Nostoc muscorum</i> como potencial bioestimulante en plantas de lechuga bajo condiciones de invernadero. Sara Ambrocio. En progreso
Proteínas y lípidos de la biomasa de <i>Chlorella vulgaris</i> (G120) bajo diferentes condiciones ambientales. Natalia Jiménez Conejo. En progreso
Optimización del crecimiento de la biomasa de <i>Nostoc sp.</i> para la producción de biofertilizante nitrogenado. Alejandro Gomez. En progreso
LABIOMIC, CIMAR https://cimar.ucr.ac.cr/publicaciones-articulos-cientificos-suplementos-boletines-ucr/ y

Anexo 3

Artículos y tesis realizados en el laboratorio de microalgas del CIB, Tecnológico de Costa Rica

ARTÍCULOS PUBLICADOS
Murillo-Vega, F., Faith-Vargas, M., Chicas-Romero, M., Meneses-Montero, K., & Villalta-Romero, F. (2024). Avances en biotecnología microalgal en Costa Rica: contribuciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <i>Tecnología en Marcha</i> , 37, especial, 54-62.
Guerrero Barrantes, M., et al. (2019). Biotecnología microalgal en Costa Rica. <i>Tecnología en Marcha</i> , 32, especial, 92-98.
Carvajal Oses, M., Chacón Guzmán, J., & Herrera-Ulloa, A. (2018). Optimización en la producción de la microalga marina <i>Nannochloropsis oculata</i> en un fotobiorreactor tubular helicoidal. <i>Revista Tecnología en Marcha</i> , 31(2), 143-169.
TESIS
Sánchez, H. J. (2023). Cultivo de microalgas en un efluente residual acuícola para la producción de biometano. Instituto Tecnológico de Costa Rica. rinacional.tecnm.mx
Valencia Molina, J. A. (2023). Implementación de un sistema de cultivo automático de microalgas. Instituto Tecnológico de Costa Rica. dspace.ups.edu.ec

FUENTE CIB <https://www.tec.ac.cr/microalgas>