

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARACTERIZACIÓN MOLECULAR, FISICOQUÍMICA Y CRECIMIENTO *EX-SITU* DEL ALGA PARDA *SARGASSUM SPP.* (PHAEOPHYCEAE OCHROPHYTA) DEL PACÍFICO DE COSTA RICA, COMO BASE PARA SU USO

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de
Estudios de Posgrado en Biología para optar por el grado y título de
Maestría Académica en Biología

MARIANA VIALES CUBILLO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

DEDICATORIA

A mi familia pequeña,
por ser mi hogar, mi refugio y mi fuerza.

Y especialmente a mis papás,
por darme todo y más,
por impulsarme siempre a seguir mis sueños
y por apoyarme sin condiciones para estudiar lo que me apasiona,
sin nunca poner un pero.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por estar siempre presente. En especial a mis papás y a mi hermana, por su amor incondicional y apoyo constante, incluso cuando el tema que me apasiona no era del todo familiar para ellos. Gracias por confiar en mí y por impulsarme a estudiar lo que amo, sin poner nunca un pero.

A Fabián, mi compañero de vida y aventuras, por acompañarme en tanto en el campo como en el laboratorio, por su apoyo incansable, su paciencia, sus consejos y por escuchar con atención mis dudas y planteamientos biológicos —aun cuando eran enredados o repetitivos.

A mi directora de tesis, Cindy Fernández-García, agradezco profundamente su guía, por creer en mí incluso en los momentos en que yo no lo hacía, por su escucha genuina, y por transmitirme con tanta pasión el amor por las algas. Ha sido una mentora excepcional y un ejemplo poderoso de cómo las mujeres pueden abrirse camino y brillar en la ciencia.

A Alejandro Buschmann, gracias por su sabiduría, sus consejos, y su generosidad. Su acompañamiento me ha aportado muchísimo. A Germán Madrigal, por acogerme en su laboratorio y brindarme la oportunidad de aprender desde un campo tan diferente al mío.

Al CIMAR, que fue mi segunda casa durante estos años, y especialmente al laboratorio de ficología y sus asistentes. A Kaylen, Kenneth, Mariana e Isabel, por su apoyo, compañía y generosidad dentro y fuera del laboratorio. A Natalia, por su ayuda en el trabajo de laboratorio. A Fabio y Paola, por acompañarme en el trabajo de campo y convertir toda la experiencia en algo mucho más ameno; trabajar con amigos nunca se sintió como trabajo.

Agradezco también a los profesores y funcionarios de la Escuela de Biología que me ofrecieron asesoría y apoyo a lo largo del camino: Laura Brenes, Jeffrey Sibaja, Federico Albertazzi y José Manuel Picado.

A la ONG Oceans Oasis, al Diving Center Cuajiniquíl y al proyecto BIOMAR y a Guanacaste Dry Forest Conservation Fund, por el respaldo brindado para llevar a cabo parte del trabajo de campo especialmente bajo los proyectos B7-903 y C3-262. Agradezco especialmente a la familia Lara —Minor, Minor, Steven e Ivania— por su apoyo logístico, hospitalidad y su genuina disposición a aprender sobre las algas y compartir el camino con entusiasmo. Así como al Área de Conservación Guanacaste (ACG) y en general al Sistema Nacional de Áreas de Conservación por el apoyo con los permisos de colecta.

Al CELEQ en especial a Luis Gutiérrez por facilitarme el equipo para procesar mis muestras, y al INIFAR, a Germán Madrigal y a Carolina Herrera, por prestarme sus instalaciones y equipo para realizar las pruebas fisicoquímicas y capacitarme en ellas.

Finalmente, a mis amigos y amigas de carrera, con quienes crecí desde el inicio de mi formación académica y a quienes espero tener siempre cerca en especial a: Felipe, Valeria, Vidal, Jeremy y Pablo. Gracias por hacer de este camino algo más ligero, divertido y significativo.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Posgrado en Biología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Maestría Académica en Biología”



Dra. Melissa Mardones Hidalgo

Representante del Decano Sistema de estudios de Posgrado



Dra. Cindy Fernández García

Directora de Tesis



Dr. Alejandro H. Buschmann Rubio

Asesor



Dr. German Madrigal Redondo

Asesor



M.Sc. Laura Brenes Guillen

Representante del Director Programa de Posgrado en Biología



Mariana Viales Cubillo

Candidata

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	5
CAPITULO 1. Integrative approach to species delimitation in <i>Sargassum</i> (Fucales, Phaeophyceae) from Central American Pacific based on morphological and Genetic Evidence	7
CAPÍTULO 2. Revisión sistemática de los usos de las especies y compuestos del género <i>Sargassum</i> (Sargassaceae)	35
CAPÍTULO 3. Hacia el aprovechamiento sostenible de <i>Sargassum liebmannii</i> (Sargassaceae) en Costa Rica: caracterización fisicoquímica y evaluación de crecimiento	102
CONCLUSIONES GENERALES	132
REFERENCIAS	135

RESUMEN

Esta tesis aborda un análisis comprensivo del género *Sargassum* en el Pacífico Este Tropical, integrando enfoques morfológicos, moleculares y aplicados para contribuir a su conocimiento taxonómico y su aprovechamiento sostenible. En el primer capítulo se caracterizó la diversidad morfológica y genética de *Sargassum* en el Pacífico de Centroamericano, logrando delimitar especies previamente identificadas y describir una especie nueva para el género: *Sargassum lacrucense*, así como una nueva sección dentro de este. El análisis se sustentó en el uso combinado de marcadores moleculares (ITS2 y COX3), observaciones morfológicas detalladas y comparaciones con especímenes tipo, lo cual permitió esclarecer la identidad de las especies presentes en la región. El segundo capítulo presenta una revisión sistemática de las aplicaciones de compuestos bioactivos del género *Sargassum*, analizando más de 800 publicaciones en la última década. El estudio evidencia un crecimiento sostenido en la investigación sobre el potencial biotecnológico de *Sargassum*, particularmente en los campos de la salud, cosmética, agricultura y energías renovables. Además, se identifican las especies más estudiadas, los tipos de extractos utilizados y los compuestos con mayor frecuencia de uso, lo cual sienta bases para orientar futuras investigaciones en la región. En el tercer capítulo se realizó una caracterización fisicoquímica de *Sargassum liebmannii*, especie más abundante del género en el Pacífico norte de Costa Rica, incluyendo pruebas fitoquímicas, contenido de proteínas y carbohidratos, pruebas fisicoquímicas y evaluación del crecimiento *ex situ*. Este estudio evidencia su potencial como recurso biotecnológico y genera información clave para desarrollar estrategias de aprovechamiento responsable, considerando sus características su composición y sus condiciones óptimas de cultivo. En conjunto, se pueden utilizar como una base para el análisis de especies de macroalgas aprovechables en la región.

ABSTRACT

This thesis presents a comprehensive study of the genus *Sargassum* in the Tropical Eastern Pacific, integrating morphological, molecular, and applied approaches to contribute to its taxonomic understanding and sustainable use. In the first chapter, the morphological and genetic diversity of *Sargassum* in the Central American Pacific was characterized, leading to the delimitation of previously identified species and the description of a new species for the genus: *Sargassum lacrucense*, as well as a new section within it. The analysis was based on the combined use of molecular markers (ITS2 and COX3), detailed morphological observations, and comparisons with type specimens, which allowed clarification of the identity of the species present in the region. The second chapter presents a systematic review of the applications of bioactive compounds from the genus *Sargassum*, analyzing more than 800 publications from the last decade. The study reveals a sustained increase in research on the biotechnological potential of *Sargassum*, particularly in the fields of health, cosmetics, agriculture, and renewable energy. Additionally, it identifies the most studied species, the types of extracts used, and the most frequently reported compounds, establishing a foundation for guiding future research in the region. In the third chapter, a physicochemical characterization of *Sargassum liebmannii*, the most abundant species of the genus in the northern Pacific of Costa Rica, was carried out. This included phytochemical tests, protein and carbohydrate content, physicochemical properties, and an evaluation of its *ex situ* growth. The study highlights its potential as a biotechnological resource and provides key information to develop responsible utilization strategies, considering its composition and optimal cultivation conditions. Together, these results provide a foundation for the analysis of exploitable macroalgal species in the region.

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO 1: Integrative approach to species delimitation in *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Central American Pacific based on morphological and Genetic Evidence.

Table 1. Taxonomic comparison of <i>Sargassum lacrucense</i> (sp. nov.) and <i>Sargassum liebmannii</i> based on vegetative and reproductive characters.	15
Table 2. Origin and GenBank Accession Numbers of New <i>Sargassum</i> Sequences Obtained for This Study	20

CAPITULO 2. Revisión sistemática de los usos de las especies y compuestos del género *Sargassum* (Sargassaceae)

Cuadro 1. Tipos de compuestos químicos utilizados en los 841 artículos aceptados	47
Cuadro 2. Tipos de extractos y sus polaridades presentes en los estudios analizados	50
Cuadro 3. Taxonomía a nivel de especie de las algas presentes en los 841 artículos aceptados y su ocurrencia. Resaltados se encuentran los taxones más frecuentes. Algunos estudios trabajan con más de una especie de alga, por lo que la sumatoria de la cantidad puede superar 841	54

CAPITULO 3. Caracterización fisicoquímica y evaluación de crecimiento de *Sargassum liebmannii* (Sargassaceae) perspectivas para un uso sostenible.

Cuadro. 1. Pruebas de pruebas fitoquímicas por realizar en los especímenes de <i>Sargassum liebmannii</i> colectados en el Pacífico Norte de Costa Rica.	109
Cuadro. 2. Resultados de las pruebas fitoquímicas realizadas con extractos de <i>Sargassum liebmannii</i> .	113

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: Integrative approach to species delimitation in *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Central American Pacific based on morphological and Genetic Evidence.

- Figure 1.** Subtidal *Sargassum* forests in the eastern tropical Pacific. (A) Dense alga cover of *Sargassum liebmannii* in Isla Juanilla, Costa Rica. (B) Subtidal *Sargassum liebmannii* forest in San Juan del Sur, Nicaragua. 11
- Figure 2.** Sampling sites in Central America for *Sargassum* analyses 12
- Figure 3.** Morphological characteristics of *Sargassum lacrucense* sp. nov. (A) Habit of the species. (B) Cylindrical projections on the leaf surface. (C) Variation in leaf morphology. (D) Discoid holdfast. (E) Female reproductive structure (receptacle). (F) Morphological variation of rounded vesicles. 17
- Figure 4.** Microscopic morphology of *Sargassum lacrucense* sp. nov. (A) Longitudinal section of the leaf at 40× magnification. (B) Longitudinal section of a cylindrical leaf projection at 10×. (C) Longitudinal section of the leaf at 10×. (D) Transverse section of the leaf at 10×. 18
- Figure 5.** Morphological characteristics of *Sargassum liebmannii*. (A) Habit of the species. (B) Alternating light and dark bands on leaf blades. (C) Variation in leaf morphology. (D) Rhizoidal holdfast. (E) Reproductive structure. (F) Morphology of vesicles. 20
- Figure 6.** Microscopic morphology of *Sargassum liebmannii*. (A) Longitudinal section of the leaf at 10× magnification. (B) Transverse section of the leaf at 10×. 20
- Figure 7.** Maximum likelihood phylogenetic tree based on concatenated ITS2 and COX3 sequences of the genus *Sargassum*. Bootstrap support values (ML) are shown at the center of the nodes (in boxes); only values above 50% are displayed. 22

CAPÍTULO 2. Revisión sistemática de los usos de las especies y compuestos del género *Sargassum* (Sargassaceae)

- Fig. 1.** Diagrama de flujo sobre la estrategia de búsqueda de artículos de *Sargassum* 42
- Fig. 2.** Tendencia temporal de las publicaciones sobre usos de *Sargassum* entre 2013 y 2024 43
- Fig. 3.** Distribución geográfica de los estudios sobre usos de *Sargassum* por país 44
- Fig. 4.** Distribución geográfica de estudios sobre usos de *Sargassum* por océano 44
- Fig. 5.** Distribución de los tipos de aplicaciones de compuestos derivados del Sargazo en los artículos incluidos en la revisión 45
- Fig. 6.** Distribución temporal de las aplicaciones del sargazo en la literatura científica entre 2013 y 2024 46
- Fig. 7.** 15 compuestos más utilizados en las investigaciones sobre aplicaciones de *Sargassum* 47
- Fig. 8.** Mapa de calor de la relación entre los compuestos con mayor ocurrencia y tipos de aplicaciones de *Sargassum* 52
- Fig. 9.** Especies más utilizadas en las investigaciones sobre aplicaciones de *Sargassum* 53
- Fig. 10.** Distribución de las 5 especies de *Sargassum* más frecuentes según tipo de aplicación 57
- Fig. 11.** Top 5 especies de *Sargassum* por océano, según su frecuencia de uso en diversas aplicaciones 57

CAPITULO 3. Caracterización fisicoquímica y evaluación de crecimiento de *Sargassum liebmannii* (Sargassaceae) perspectivas para un uso sostenible.

Figura 1. Crecimiento de *Sargassum liebmannii* bajo dos tratamientos de temperatura durante 10 semanas. 117

Figura 2. Tasa de crecimiento relativa (RGR) de *Sargassum liebmannii* bajo dos tratamientos de temperatura 118

LISTA DE ABREVIATURAS

MICH University of Michigan Herbarium

UC The University Herbarium of California, Berkeley

USJ University of Costa Rica Herbarium, Dr. Luis A. Fournier Origgí

CIBET Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical

CIMAR Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad de Costa Rica

CELEQ Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química

INIFAR Instituto de Investigaciones Farmacéuticas

PET Pacífico Este Tropical

RGR Tasa de crecimiento relativa

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las algas representan un grupo polifilético con diferentes orígenes filogenéticos con una amplia diversidad morfológica, estrategias de vida, estructura celular y composición química (León et al., 2007; Rodríguez-Rodríguez et al., 2018). Sin embargo, existen algunas características en común entre estos grupos, como su asociación a ambientes acuáticos, la posesión de clorofila a para realizar fotosíntesis y una morfología relativamente simplificada (Lee, 2018). Dentro de las macroalgas usualmente se reconocen de acuerdo con sus pigmentos accesorios en los Phyla Chlorophyta y Rhodophyta, y la Clase Phaeophyceae (Ochrophyta) (Graham & Wilcox, 2000). Cada grupo de algas posee composiciones químicas particulares que han sido utilizadas a lo largo de la historia por los seres humanos (Barsanti & Gualtieri, 2005).

Inicialmente fueron utilizadas como fuentes alimenticias o como productos medicinales, pero con el paso del tiempo se fueron descubriendo nuevos compuestos, lo que permitió su aplicación en nuevos campos (Barsanti & Gualtieri, 2005). En la actualidad, se observa el uso de diferentes compuestos provenientes de las algas en áreas como la industria cosmética (Wang et al., 2015), alimenticia (Ullmann & Grimm, 2021), agroquímica (Rupwalla et al., 2021), farmacéutica (Soheili & Khosravi-Darani, 2011), producción de biocombustibles (Alam et al., 2012) y tratamiento de aguas (Shekhawat et al., 2012). Ante la situación climática y ambiental que afronta la sociedad actual, tanto científicos como empresarios han comenzado a considerar la utilización de las algas y sus posibles aplicaciones a una mayor escala (Upadhyay & Singh, 2020).

El interés creciente en las macroalgas se debe, entre otros factores, a la gran cantidad y diversidad de compuestos bioactivos que poseen (Cardoso et al., 2015; FAO, 2018; Lopes

et al., 2021). El crecimiento de las macroalgas y su composición química están influenciados por diversos factores ambientales como la temperatura, salinidad, pH, radiación lumínica y nutrientes (e.g., Smit, 2004; Yeong & Wong, 2013). Esto provoca tanto variación inter como intraespecífica en los diferentes grupos, por lo que se debe prestar especial atención a estos cambios, ya que pueden afectar el valor económico de las algas (Saraswathi et al., 2003). Sin embargo, estudiar los efectos de estos factores *in situ* presenta grandes dificultades ya que no se pueden mantener condiciones controladas, por lo que, para analizar esta problemática con más detalle, se utilizan cultivos en condiciones ambientales controladas (Zou et al., 2018). Adicionalmente los experimentos controlados son los pasos iniciales para poder realizar de cultivos comerciales *ex situ* que reduzcan la presión sobre poblaciones naturales (Robaina-Romero, 1988).

Dentro de las algas pardas (Phaeophyceae, Ochrophyta), el orden Fucales es de particular interés por su diversidad de aplicaciones, y dentro de este destaca el género *Sargassum*, que es ampliamente utilizado en industrias como la farmacéutica y cosmética por sus propiedades anticoagulantes, antitumorales, antioxidantes, entre otras (Janarthanan & Kumar, 2017; Prasedya et al., 2021), así como en la industria agrícola como biofertilizante o plaguicida (Khompatara et al., 2019), y en la industria alimentaria por la presencia de alginatos (Torres et al., 2007).

Sargassum, es el género más diverso dentro de las Fucales, presenta una notable variabilidad morfológica (Guiry & Guiry, 2010; Mattio & Payri, 2011) y una distribución global, con especial diversidad en regiones tropicales e intertropicales, donde forma bosques submarinos complejos que representan ecosistemas complejos habitados por numerosos organismos (Phillips, 1995; Thibaut et al., 2005). Su clasificación taxonómica se basa en caracteres morfológicos y en su ciclo de vida haplontico; sin embargo, diversos

autores señalan una gran complejidad taxonómica ya que sus especies presentan una alta plasticidad fenotípica y un elevado nivel de polimorfismos (Mattio & Payri, 2011). Por ello, su identificación taxonómica resulta una tarea compleja que en diversas ocasiones puede llevar a errores o ambigüedades en la identificación (Mattio et al., 2009; 2010). Para evitar identificaciones erróneas ya que estas pueden llevar a la selección incorrecta de las especies que contienen moléculas de interés para futuras aplicaciones (Mattio & Payri, 2011), diversos autores han propuesto complementar la clasificación con técnicas moleculares como el código de barras genético, que permite mayor resolución y menor cantidad de material (Hayden et al., 2003; Faye et al., 2004; Robba et al., 2006; Chase et al., 2007; Alshehri et al., 2019).

En las costas de Costa Rica se han descrito un total de 16 especies del género *Sargassum*. En la costa Pacífica, la literatura reporta dos especies: *Sargassum brandegeei* (Taylor, 1945) y *Sargassum liebmannii* (Dawson, 1957; Cortés, 1993; Bernecker, 2009) (Fernández-García et al., 2011). Sin embargo, de acuerdo con la Dra. Cindy Fernández-García y con los ejemplares depositados en el Herbario USJ de la Universidad de Costa Rica, históricamente solo se ha colectado una de estas especies en el país. En los últimos tres años, se han identificado dos morfotipos distintos en el Pacífico Norte que no calzan completamente con las descripciones taxonómicas disponibles para las especies previamente reportadas, lo que sugiere una posible diversidad específica aún no documentada. Esta situación resalta la necesidad de realizar estudios morfológicos y genéticos que permitan esclarecer la identidad taxonómica de estos morfotipos.

En esta región del Pacífico Norte, *S. liebmannii* presenta un patrón estacional, con mayor abundancia entre noviembre y mayo, coincidiendo con eventos de afloramiento que permiten que los talos alcancen hasta 1 metro de altura (Cortés et al., 2014). Una vez

alcanzado su tamaño máximo, los talos se desprenden del sustrato y flotan en la bahía o se acumulan en las playas. Además, se desarrollan bosques estacionales de *Sargassum*, únicos en el Pacífico costarricense, con alta cobertura (Alvarado et al., 2021). Finalmente, en esta zona existe una comunidad costera organizada y dispuesta a colaborar en proyectos relacionados con el cultivo y aprovechamiento de estas algas (Comunicación personal, Dra. Cindy Fernández-García), por lo que el proyecto que se presenta a continuación se desarrollará en esta región del país.

La utilización de diferentes grupos de algas en la industria costarricense representaría un gran avance hacia la implementación de una economía azul, lo cual contribuiría al aprovechamiento de recursos naturales abundantes en el país, que usualmente se menosprecian. En adición a esto podría representar un beneficio para comunidades costeras vulnerables, debido a que, ante la posible escasez de peces, camarones y moluscos, aptos para captura y en general la falta de trabajo en estas comunidades, tanto el cultivo como la cosecha de algas representarían fuentes alternativas de ingresos (FAO, 2018). De acuerdo con los objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas (2018), estas aplicaciones se podrían enmarcar en su objetivo 14 (vida submarina), ya que corresponden a posibles utilidades de los recursos marinos para el desarrollo sostenible. Principalmente mediante el aumento de beneficios económicos a un país en vías de desarrollo, como lo es Costa Rica y mediante el aumento de conocimiento científicos y su transmisión. Adicionalmente el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPECA) presenta un gran interés con respecto al uso de este recurso ya que lo ven como una alternativa sostenible para las comunidades pesqueras (Com. Pers. Ministro—Heiner Méndez Barrientos).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, este trabajo de tesis busca generar

información científica sobre el género *Sargassum* en la costa Pacífica de Costa Rica, con el fin de aportar insumos técnicos para su aprovechamiento sostenible en el marco de una economía azul. Específicamente, se plantea la caracterización taxonómica, fisicoquímica y ecológica de las especies presentes, mediante la diferenciación morfológica y molecular de los morfotipos observados, la caracterización fisicoquímica de los talos, y la evaluación de su crecimiento en condiciones controladas frente a variables abióticas. Además, de realizar una revisión sistemática sobre las aplicaciones potenciales del género *Sargassum*, con el objetivo de identificar los compuestos bioactivos presentes y proponer posibles usos en sectores como salud, agricultura o biomateriales. De esta manera, los resultados obtenidos contribuirán a responder las preguntas de investigación planteadas y proporcionarán una base científica para futuros proyectos de cultivo, manejo y uso sostenible de estas algas en comunidades costeras del país.

OBJETIVOS

Objetivo general: Realizar la caracterización taxonómica, química y la evaluación de variables abióticas en el crecimiento de las especies del género *Sargassum* (Phaeophyceae, Ochrophyta) presentes en la costa Pacífica de Costa Rica, con el fin de identificar los compuestos presentes en cada especie y sugerir posibles aplicaciones para estos.

Objetivos específicos:

- 1- Diferenciar morfológica y molecularmente las especies del género *Sargassum* presentes en la costa del Pacífico de Costa Rica
- 2- Elaborar una revisión de las posibles aplicaciones para el género *Sargassum*.
- 3- Caracterizar fisicoquímicamente las especies del género *Sargassum* del Pacífico costarricense.

- 4- Realizar experimentos controlados *ex-situ* de crecimiento de *Sargassum* con respecto a variables abióticas

CAPITULO 1. Integrative approach to species delimitation in *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Central American Pacific based on morphological and Genetic Evidence

En formato de artículo científico para publicación en la Revista Diversity

Integrative approach to species delimitation in *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Central American Pacific based on morphological and Genetic Evidence

Mariana Viales-Cubillo ^{1,2*}, Fabio Quesada-Perez ^{1,4}, Paola Díaz-Canales ¹, Kaylen Gonzalez-Sánchez¹ and Cindy Fernández-García ^{1,3}

1 Centro de Investigaciones en ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica.

2 Posgrado de Biología, Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica

3 Escuela de Biología y Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical (CIBET), Universidad de Costa Rica

4 Posgrado en Gestión Integrada de Áreas Tropicales, Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica

*Correspondence: cindy.fernandezgarcia@ucr.ac.cr

Abstract: Abstract: The genus *Sargassum* is taxonomically complex and poorly studied in the Eastern Tropical Pacific. We analyzed specimens collected along the Pacific coast of Central America and compared them with historical records and herbarium material to clarify species identities. Using detailed morphological analyses with molecular phylogenetic reconstruction based on concatenated ITS2 and COX3 sequences, we identify two distinct morphotypes corresponding to two well-supported clades. One clade matches the morphology and molecular profile of *Sargassum liebmannii*. We provide the most comprehensive description of this species to date, including the first published ITS2 and COX3 sequences. Since Taylor's 1945 work on the tropical Pacific of the Americas, *S. liebmannii* has been widely reported and considered the predominant species. It forms a genetic clade with other species from the Gulf of California; therefore, we propose a new section, Herporhizum/Sinicola. The second clade represents a previously unrecognized taxon from Central America, which we describe as a new species: *Sargassum lacrucense*, within the subgenus *Sargassum*, section *Sargassum*. Contrary to previous reports, *Sargassum brandegeei*—now recognized as *Sargassum herporhizum*—was not found in the region. This study underscores the importance of integrating morphological and molecular data to resolve *Sargassum* taxonomy in Central America.

Keywords: barcoding; *Sargassum liebmannii*; *Sargassum lacrucense*, Eastern Tropical Pacific; taxonomy; ITS-2; COX3

1. Introduction

Brown algae (Phaeophyceae, Heterokontophyta) of the order Fucales are widely distributed in coastal areas around the world, with particularly high diversity in tropical and intertropical regions. In these environments, they form underwater forests that constitute structurally complex ecosystems of great ecological importance [1-5]. Their taxonomic classification is mainly based on morphological characteristics and their haplontic life cycles; however, this is complicated by the marked phenotypic plasticity and high level of polymorphism exhibited by many of their species [6].

Within the order Fucales, the genus *Sargassum* is the most diverse and is known for its high morphological variability, which has led to numerous taxonomic challenges and ambiguities in species delimitation [7-10]. This difficulty in identification can have both ecological and biotechnological implications, as some species contain bioactive compounds of interest, and misidentification can lead to errors in their selection [6]. Given these limitations, several studies have promoted the use of molecular tools, such as DNA barcoding, to support taxonomic identification and phylogenetic studies within the genus *Sargassum* [8,11]. This technique has proven useful due to the small amount of material required and its high resolution at different taxonomic levels [12,13].

In the Pacific of Central America, along the coasts of Costa Rica and Nicaragua, seasonal *Sargassum* forests (Figure 1) have been recorded, with significant coverage during the colder months of the year (November to February), associated with upwelling events that increase nutrient availability [14–16]. These macroalgal forests play a crucial ecological role, serving as feeding grounds and nursery habitats for a wide variety of invertebrates, including mollusks, crustaceans, and polychaetes. The structural complexity of *Sargassum* provides shelter and food resources that support rich and diverse benthic communities. In Costa Rica, *Sargassum* ecosystems have been recognized as conservation targets in marine spatial planning and ecosystem-based management analyses conducted by the Ministry of Environment, due to their ecological importance and vulnerability to environmental change [17].

Regarding specific composition, *Sargassum liebmannii* J. Agardh has been reported along the coasts of Costa Rica, Panama, Nicaragua, and El Salvador [14,18–22]. Beyond Central America, the species has also been recorded in North America, including Baja California, the Gulf of California, the Islas Revillagigedo and other regions of the tropical Pacific coast of Mexico [1, 20, 23-26]. In South America, specifically in Brazil [27] and Colombia [1]. The type locality of *Sargassum liebmannii* is San Agustín, Mexico. The isotype specimen (Figure A1) is incomplete, lacking a holdfast, but includes reproductive structures. Additionally, *Sargassum brandegeei* Setchell & N.L.Gardner has been documented in Costa Rica [20], and *Sargassum sinicola* Setchell & N.L.Gardner in Nicaragua [21].

Recent observations suggest the existence of a single dominant morphotype in some of these locations [28], highlighting the need for more detailed studies. Since the observed morphological variation could reflect unrecognized interspecific differences, it is essential to integrate morphological and molecular tools to clarify the species diversity of the genus in this region. In this study, we assessed the morphological variation and genetic structure of *Sargassum* populations collected in the northern Pacific of Costa Rica, complemented with specimens from Panama, Nicaragua and El Salvador. To this end, we used two molecular markers (COX3 and ITS2) and a set of morphological measurements to explore species delimitation in this region of the Central American Pacific. Specifically, we aim to (i) clarify the taxonomy of the collected *Sargassum* specimens based on phylogenetic and morphological analyses, and (ii) provide a reference framework for the identification of *Sargassum* species in the region.

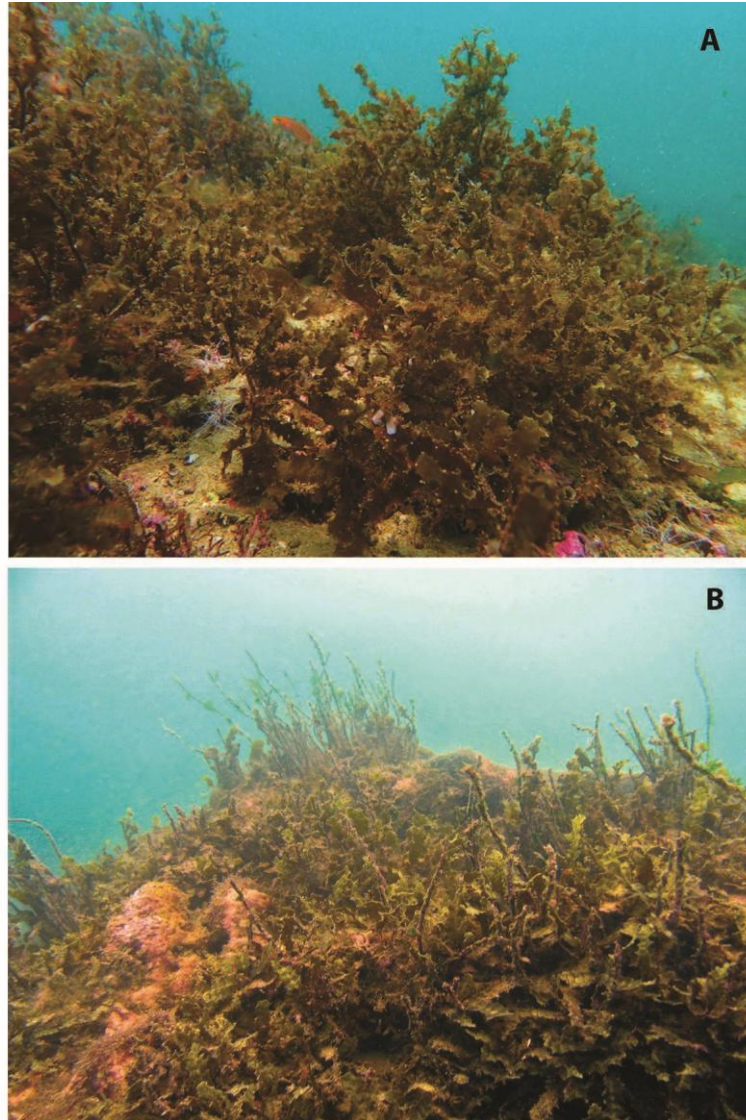


Figure 1. Subtidal *Sargassum* forests in the eastern tropical Pacific. (A) Dense alga cover of *Sargassum liebmannii* in Isla Juanilla, Costa Rica. (B) Subtidal *Sargassum liebmannii* forest in San Juan del Sur, Nicaragua.

2. Materials and Methods

2.1 Study area and sample collection

Specimens of the genus *Sargassum* were collected along the northern Pacific coast of Costa Rica during April and June of 2023, 2024 and 2025 (Figure 2), in localities characterized by the presence of seasonal macroalgal forests. All collected specimens corresponded to mature individuals, most of them in reproductive condition. Collection was carried out by snorkelling, SCUBA diving, or manual gathering, depending on the depth at which the specimens were found. At each site, morphotypes were preliminarily identified in situ based on observable morphological traits, following previously published taxonomic

descriptions including relevant characters such as type of holdfast, leaf shape and margin, and reproductive structures. In addition, collections from Costa Rica, Nicaragua, Panama, and El Salvador form the collection of the Phycology Laboratory at the University of Costa Rica (Figure 2), as well as specimens from various herbaria (UC, MICH, USJ), were used.

For molecular analyses, between 100 and 150 mg of tissue per sample were collected and stored frozen until laboratory processing. In addition, one well-preserved specimen of each morphotype, along with a duplicate, was selected for inclusion in the institutional herbarium. Complete specimens were photographed and labeled for later morphological analysis.

All collected specimens were deposited in the USJ Herbarium, at CIBET, University of Costa Rica, and all genetic sequences obtained were deposited in GenBank.

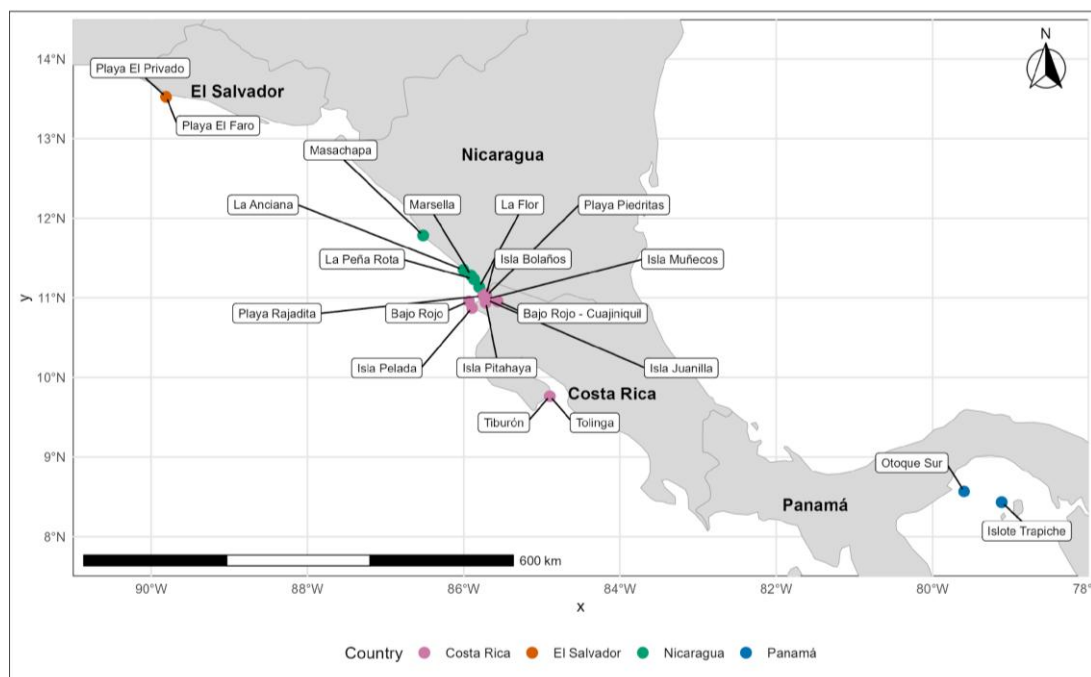


Figure 2. Sampling sites in Central America for *Sargassum* analyses

2.2 Morphological characterization

A detailed morphological analysis was conducted using at least 10 representative specimens of each collected morphotype. For each specimen, the total thallus length was measured, and ten leaves were selected from each thallus. For these leaves, length and width

were recorded, along with the number and arrangement of cryptostomata, the presence of a central vein, and the characteristics of the leaf margin, base and apex. The shape of aerocysts and receptacles, when present, was also recorded. In addition, cross-sections of the leaves were made to determine the number of cells in the medullary region, and the type of holdfast and shape of the main growth axis were characterized. Leaves were photographed against a white background with a millimeter scale, and morphometric measurements were carried out using the software ImageJ 1.x [29]. Qualitative characteristics were evaluated through direct observation, following the morphological terminology proposed by Mattio & Payri (2011) [6]. The resulting data were used to compare morphological variation among morphotypes and to complement the results of the genetic analysis.

2.3 Amplification and sequencing

Two organellar gene regions were amplified by PCR: the internal transcribed spacer 2 (ITS-2) and the cytochrome oxidase subunit 3 (cox3). For the ITS-2 region, primers 5.8S-BF [30] and 25BR-2 [31] were used, while for cox3, primers CAF4A and CAR4A [32] were employed.

PCR reactions were prepared with a final volume of 25 μ L per reaction. The mix included: 2.5 μ L of 10 \times buffer, 2.5 μ L of dNTPs (200 μ M), 1 μ L of BSA, 1 μ L of forward primer, 1 μ L of reverse primer, 0.1 μ L of Taq polymerase, 15.9 μ L of Milli-Q water, and 1 μ L of DNA. Amplified products were verified by electrophoresis on 1% agarose gel and subsequently sent for bidirectional sequencing through the company Macrogen (South Korea). The resulting sequences were assembled and edited using the software Bench-ling (available at <https://benchling.com>).

2.4 Alignment and phylogenetic analysis

The sequences were aligned separately for the two markers using MAFFT online v.7 [33] (available at <https://mafft.cbrc.jp/alignment/server/index.html>), using the L-INS-i strategy, which is recommended for small alignments and sequences of varying lengths. Once aligned, the sequences were examined in MEGA 11 [34], although no manual editing was performed. Instead, the G-blocks program (v 0.91b) [35] was used to remove ambiguous regions from the alignment. The least stringent parameters were used: allowing small final

blocks, permitting gap positions within the final blocks, and permitting less strict flanking positions. After removal of ambiguous regions with Gblocks, the final alignment lengths were 434 nucleotides for ITS2 and 433 nucleotides for COX3.

After editing, the online version of FindModel (available at <https://www.hiv.lanl.gov/content/sequence/findmodel/findmodel.html>) [36] was used to determine the best-fit nucleotide substitution model for each marker. The 28 default parameters of the program were used. One model was selected for ITS2 and three models for COX3 (one for each codon position since it is a protein-coding region). The GTR+Gamma model was identified as the best fit for both ITS2 and all three codon positions of COX3.

Phylogenetic reconstructions were carried out using Maximum Likelihood (ML) [37] in RAxML-GUI 2.0 [38]. The only parameters specified were the bootstrap substitution model (GTRGAMMA) and the exclusion of invariant sites. A total of 1000 boot-strap replicates were selected. The rest of the settings were left at default values. For COX3, a partition model was added to indicate that the region was protein-coding.

After conducting separate analyses for both markers, the results were compared to evaluate congruence. The individual ITS2 and COX3 phylogenies were generally congruent in the main clades but showed some minor differences in the resolution of certain internal nodes and relationships among closely related taxa. In both separate trees, the newly identified morphotypes formed distinct, well-supported clades, yet the level of support and the relationships with nearby species varied slightly. The concatenated tree (ITS2 + COX3) provided improved resolution and stronger support values across most nodes, clearly separating the two Costa Rican morphotypes into robust clades. Since no significant topological conflicts were found—defined as incongruence in the topology of nodes with bootstrap values (BS) greater than 80%—the two sets of sequences were concatenated. This was done using MEGA 11 [34], resulting in a file containing both concatenated markers. This file was then subjected to a Maximum Likelihood analysis, using the parameters described above, except for the partition file, which was configured to include three partitions (the three COX3 codon positions plus the ITS2 region). Finally, the trees were visualized and edited using iTOL v6 [39].

3. Results

3.1 Morphological analysis

A total of 67 specimens of the genus *Sargassum* were analyzed, collected between 2009 and 2024. Of these, 38 correspond to recent collections carried out between 2023 and 2024, 11 come from samples collected in 2009, and 18 belong to the historical collection of the Phycology Laboratory at the University of Costa Rica (UCR). Additional specimens were examined from the Luis Fournier Origgí Herbarium (USJ), the University of Michigan Herbarium (MICH), and the isotype of *Sargassum liebmannii* pre-served at the University of California, Berkeley Herbarium (UC).

The morphological analysis revealed two clearly differentiated morphotypes, distinguished primarily by leaf characteristics, shape of the main axis, vesicle morphology, and type of holdfast (Table 1). However, the morphotypes do not fully correspond to previously reported taxonomic descriptions for the region, highlighting the need for further investigation to determine whether they represent intraspecific variation or a potentially undescribed species.

Table 1. Taxonomic comparison of *Sargassum lacrucense* (sp. nov.) and *Sargassum liebmannii* based on vegetative and reproductive characters.

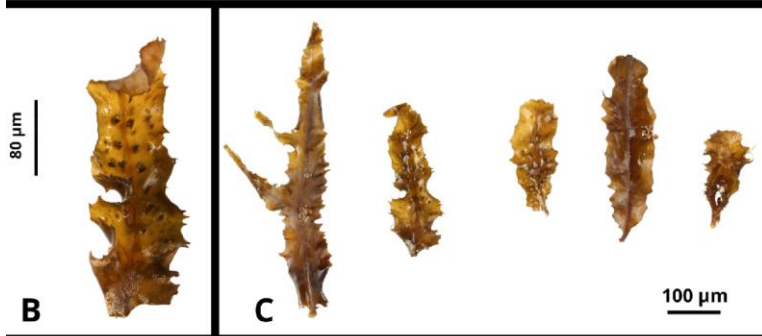
Characteristic	<i>S. lacrucense</i> (sp. nov.)	<i>S. liebmannii</i> (Agardh)
Thallus size	Up to 44 cm, shrubby	Up to 56 cm, slender
Type of holdfast	Discoid	Rhizoidal
Main axis shape	Cylindrical and smooth	Terete, smooth, grows from rhizoid
Leaf shape	Simple or divided multiple times; oblong to linear	Simple, lanceolate to oblong, mostly undulate
Leaf dimensions (cm) (L/W)	1.21–6.23 / 0.54–2	1.27–9.05 / 0.37–1.40
Leaf margins	Serrulate	Serrulate to deeply dentate
Central vein	Percurrent	Percurrent
Petiole	Short, cylindrical to flattened, with apical spines Narrow and symmetrical	Short to medium, smooth

Leaf base		Rounded to narrow, asymmetrical
Leaf apex	From acute to rounded	Mostly acute
Leaf thickness	3–4 medullary cells	8–9 medullary cells
Cryptostomata	Inconspicuous, in rows along the vein	Conspicuous, scattered
Vesicles	Spherical, rough; some with foliar-like bases	Ovoid or spherical, majority with spines
Receptacles (♀)	In clusters along the thallus, with dichotomous branches and smooth margins	In clusters on upper thallus, with smooth or spiny margins
Receptacles (♂)	Solitary, branched, linear with smooth margins	In clusters on upper thallus, branched with smooth margin
Remarks	Leaves with conical projections on surface	Leaves with alternating light/dark brown bands
Systematic position	Subg. <i>Sargassum</i> , sect. <i>Sargassum</i>	Subg. <i>Sargassum</i> , sect. <i>Sinicola/Herporhizum</i>

One of the morphotypes appears to fit the original description of *Sargassum lieb-mannii* (Figures 3 and 4); although the isotype is incomplete, lacking both holdfast and vesicles, the remaining features are consistent with the specimens analyzed. In contrast, the second morphotype does not correspond to any previously reported descriptions for the region and exhibits a unique combination of characters that suggest its recognition as a new species (Figures 5 and 6).

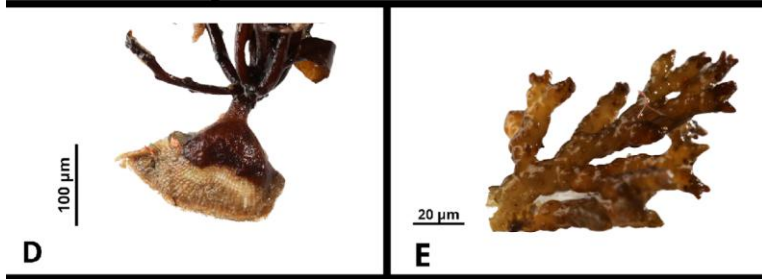


A



B

C



D

E



F

Figure 3. Morphological characteristics of *Sargassum lacrucense* sp. nov. (A) Habit of the species. (B) Cylindrical projections on the leaf surface. (C) Variation in leaf morphology. (D) Discoid holdfast. (E) Female reproductive structure (receptacle). (F) Morphological variation of rounded vesicles.

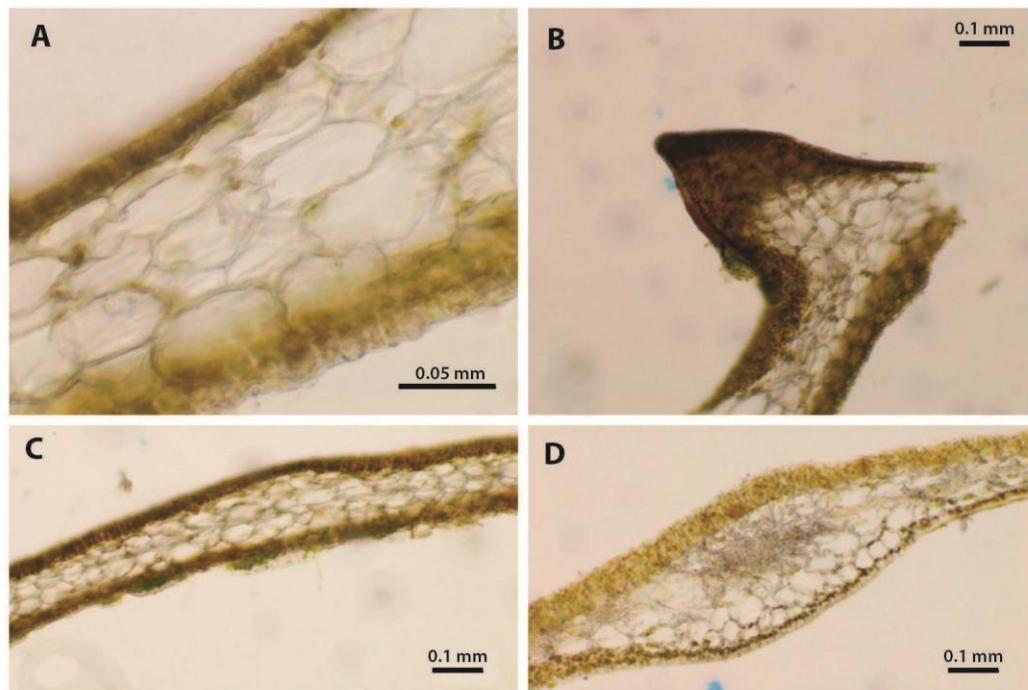


Figure 4. Microscopic morphology of *Sargassum lacrucense* sp. nov. (A) Longitudinal section of the leaf at 40× magnification. (B) Longitudinal section of a cylindrical leaf projection at 10×. (C) Longitudinal section of the leaf at 10×. (D) Transverse section of the leaf at 10x.



A



B



C



D



E



F



Figure 5. Morphological characteristics of *Sargassum liebmannii*. (A) Habit of the species. (B) Alternating light and dark bands on leaf blades. (C) Variation in leaf morphology. (D) Rhizoidal holdfast. (E) Reproductive structure. (F) Morphology of vesicles.

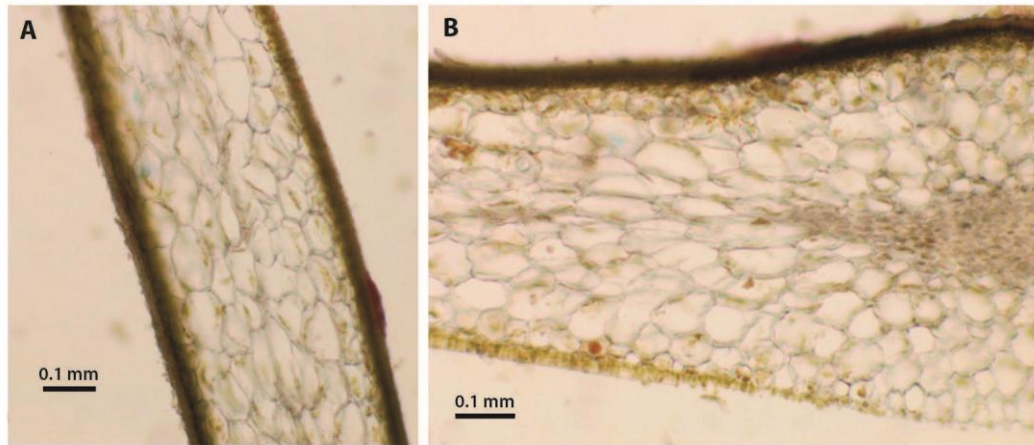


Figure 6. Microscopic morphology of *Sargassum liebmannii*. (A) Longitudinal section of the leaf at 10× magnification. (B) Transverse section of the leaf at 10×.

3.2 Phylogenetic analysis and congruence with morphology

A total of 18 original sequences were obtained for the ITS-2 region and 6 for the COX3 marker (Table 2), supplemented with additional sequences retrieved from Gen-Bank (Table B1). In total, 46 unique sequences were included in both individual and concatenated phylogenetic analyses. The ITS-2 alignment was 434 base pairs long, the COX3 alignment 433 base pairs, and the concatenated alignment reached a total of 867 base pairs, maintaining separate partitions by marker and by codon position for COX3.

Table 2. Origin and GenBank Accession Numbers of New *Sargassum* Sequences Obtained for This Study

Taxon	Voucher	Collection site	ITS2	COX3
<i>Sargassum liebmannii</i>	UCR-2161	Playa Piedras, El Jobo, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica	PX060136, PX060137	
<i>Sargassum liebmannii</i>	UCR-2172	Isla Muñecos, Bahía Salinas, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica	PX060138	
<i>Sargassum liebmannii</i>	PAN-244	Las Perlas, Golfo de Panamá, Panamá	-	
<i>Sargassum liebmannii</i>	NIC-349	La Flor, San Juan del Sur, Nicaragua	-	

<i>Sargassum liebmannii</i>	UCR-2201	Bajo Rojo, Cuajiniquil, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica	-
<i>Sargassum lacrucense</i>	UCR-2196	Isla Muñecos, Bahía Salinas, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica	PX060141
<i>Sargassum lacrucense</i>	UCR-2174	Playa Piedras, El Jobo, La Cruz, Guanacaste Costa Rica	PX060139
<i>Sargassum lacrucense</i>	NIC-348	La Flor, San Juan del Sur, Nicaragua	-
<i>Sargassum lacrucense</i>	UCR-2131	Isla Pelada, Islas Murciélago, Guanacaste Costa Rica	PX060140

Since no significant topological incongruences were found in the individual trees—defined as conflicting nodes with bootstrap support values greater than 80% the two markers were concatenated. The resulting phylogenetic tree showed a clear separation between the two morphotypes (Figure 7), which, although both grouped within the subgenus *Sargassum*, were placed in different sections.

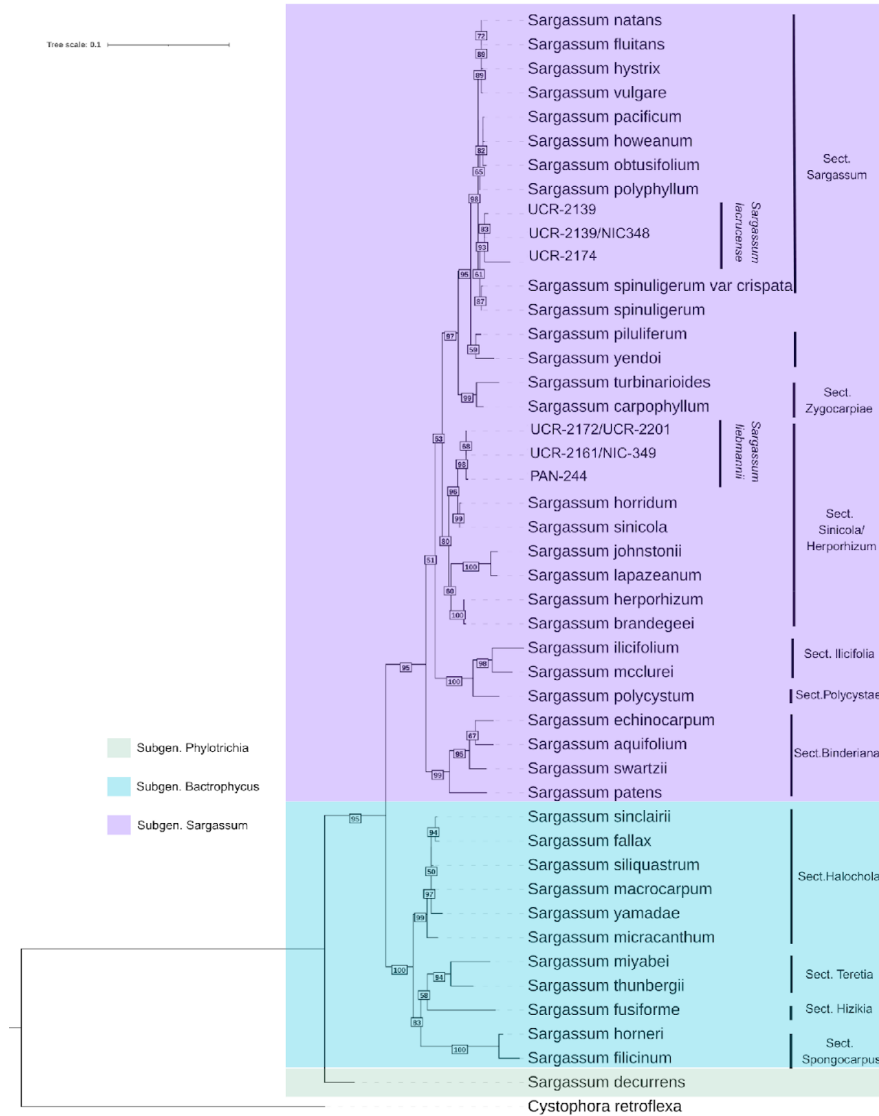


Figure 7. Maximum likelihood phylogenetic tree based on concatenated ITS2 and COX3 sequences of the genus *Sargassum*. Bootstrap support values (ML) are shown at the center of the nodes (in boxes); only values above 50% are displayed.

The tree recovered five previously defined sections within the subgenus *Sargassum*: Binderiana, Polycystae, Ilicifolia, Zygocarpiae, and Sargassum. The morphotype that does not match previous descriptions was placed within the section *Sargassum*, suggesting that it may represent an undescribed species. The second morphotype clustered with species from Baja California, such as *Sargassum sinicola* and *Sargassum horridum* Setchell & N.L.Gardner, forming a well-supported clade that may represent a poorly characterized or

yet-to-be-formally defined section within the subgenus, especially considering that no sequences of *Sargassum liebmannii* had been previously published.

4.3 Morphological descriptions

Section Sargassum

Sargassum lacrucense Viales-Cubillo & Fernández-García, sp. nov. (Figures 3 and 4)

Description: *Sargassum lacrucense* is characterized by bushy specimens reaching up to 44 cm in length, with well-developed discoid holdfasts. The main axis is cylindrical and smooth, with simple or repeatedly divided leaves ranging from oblong to linear in shape. Leaves have a narrow and symmetrical base, and apices ranging from acute to rounded. Leaf thickness consists of 3–4 medullary cells. Margins are serrulated, and a prominent central vein is present. Petioles are short, cylindrical to flattened, and often bear spines on apical leaves. Cryptostomata are inconspicuous and arranged in rows along the central vein. Vesicles are spherical and rough, some with winged or foliated bases. Female receptacles appear in clusters along the thallus, with dichotomous branches and smooth margins, while male receptacles are solitary, branched, linear and have smooth margins. Most leaves display cortical cell projections, which represent a distinctive feature of this morphotype. Female receptacles occur in clusters along the thallus, often arranged on dichotomously branched axes, and possess smooth margins. Male receptacles, occur also along the thallus, are solitary, linear and branched and with smooth margins.

Habitat: This species occurs in both intertidal zones and open waters over rocky substrates. Down to 13 meters depth.

Distribution in Central America: recorded along the Pacific coasts of Costa Rica, Nicaragua, and El Salvador.

Etymology: The specific epithet *lacrucense* honors the administrative unit canton of La Cruz, located in the province of Guanacaste, Costa Rica, where part of the type material was collected. In addition to being one of the main localities where this species occurs, members of the local community actively participated in the collection of specimens. The community of La Cruz maintains a strong cultural and emotional connection to the sea, which adds symbolic value to the naming of the species.

Type locality: Isla Juanilla, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica

Holotype: USJ 116864

Isotype: USJ 11685

Paratypes: USJ 22581; USJ 118666; USJ 116867; USJ 116868; USJ 116869

Section Sinicola/Herporhizum sect. nov. (Andrade-Sorcía) Fernández-García & Viales-Cubillo

Sargassum liebmannii J. Agardh (Figures 5 and 6)

Description : *Sargassum liebmannii* has slender specimens that can reach up to 56 cm in length, with rhizoidal holdfasts. The main axis is terete and smooth, developing from multiple growth points arising from a prostrate basal axis that functions similarly to a rhizome. Leaves are simple, lanceolate to oblong, and often wavy. Leaf thickness consists of 8–9 medullary cells. The leaf base is rounded to narrow and typically asymmetrical, with mostly acute apices. Margins are serrated to deeply toothed, and a percurrent central vein is present. Petioles are short to medium in length and smooth. Cryptostomata are conspicuous and scattered across the leaf surface.

Vesicles are ovoid or spherical and frequently bear spines, crowns, or foliated structures. Male and female receptacles occur in clusters at the upper part of the thallus, are branched, and may have either smooth or spiny margins. A distinctive feature of this species is the presence of alternating bands of light and dark brown pigmentation on many of its leaves. Both male and female receptacles occur in clusters on branchlets that may be interspersed with leaves or entirely dedicated to reproductive structures. Receptacles are generally confined to the upper portion of the thallus and are borne on dichotomously branched axes with pointed terminal tips.

Habitat: It is found in both intertidal and open coastal waters over rocky substrates, down to 10 meters depth.

Distribution in Central America: confirmed records along the Pacific coasts of Costa Rica, Panama, and Nicaragua.

Herbarium specimens: USJ 73474; USJ 73577; USJ 116870; USJ116871; USJ116872; USJ116873; USJ116874

Type locality: San Agustín, México UC-141536 (Appendix A).

4. Discussion

The results of this study confirm the presence of two morphologically and genetically distinct entities within the genus *Sargassum* along the Pacific coast of Central America. While one of the morphotypes corresponds to the original description of *Sargassum liebmannii*, the other exhibits a unique combination of morphological and molecular features that supports its recognition as a new species: *Sargassum lacrucense* sp. nov.

Historically, part of the *Sargassum* material present in Central America had been identified as *Sargassum sinicola* and *Sargassum brandegeei*. However, *S. sinicola* does not match either of the morphotypes described in this study, primarily due to differences in the type of holdfast, although the overall branching pattern and receptacle morphology could have caused confusion in the past [40]. Moreover, *S. sinicola* appears to be endemic to the Gulf of California, restricted to its northern part [41,11], a region characterized by cold-water conditions and oceanographic features such as strong tidal mixing and seasonal upwelling [42]. This pattern is not unique to *Sargassum*, as similar cases of endemism and restricted distribution have been documented in other algal genera such as *Dictyota* and *Padina* [43].

Similarly, *Sargassum brandegeei*, currently recognized as *Sargassum herporhizum* Setchell & N.L. Gardner [11], is also considered endemic to the Gulf of California. Although Dawson (1944) [19] and Norris (2010) [41] grouped it in the section *Herporhizum* along with *S. liebmannii* due to their shared rhizoidal holdfasts, *S. brandegeei* clearly differs by lacking cryptostomata [40] and is not closely related phylogenetically to Morphotype 2 (*S. liebmannii*) from this study, which clusters instead with other Baja California species. This provides strong evidence to exclude *S. brandegeei* (now *S. herporhizum*) from the Central American region.

Norris (2010) [41] also placed *Sargassum liebmannii* in the Herporhizum section, although without providing detailed information about the species. A revision of the isotype from San Agustín, Mexico, preserved at the University of Michigan Herbarium, along with the original description by J. Agardh (1847) [44], reveals that the type specimen lacks both holdfast and vesicles, which limits its interpretation. Nonetheless, the remaining morphological traits match those of Morphotype 2 described in this study. According to Andrade-Sorcía (2014) [11], *S. liebmannii* does not occur in the Gulf of California but is present in other parts of the tropical Mexican Pacific with conditions more similar to Central America [45]. Although those authors presented microsatellite data, no DNA barcoding sequences were available for phylogenetic comparison, so the match with Morphotype 2 was based solely on morphology, which was fully consistent.

Although Dawson and Norris [22, 41] placed *S. liebmannii* in the Herporhizum section, the phylogenetic results of this study suggest a closer relationship with species in the Sinicola section, such as *S. sinicola* and *S. horridum*. This raises the possibility that *S. liebmannii* has been misclassified, and that the Sinicola section may need to be redefined using molecular evidence rather than morphological characters like holdfast type alone. The topology of our concatenated tree supports the validity of the Lapazeanum and Herporhizum sections (sensu Andrade-Sorcía, 2014 [11]) but also suggests that the current limits of the Sinicola section should be revised to potentially include *S. liebmannii*, or alternatively, that a new closely related section should be proposed.

The checklist of marine macroalgae from the Central American Pacific [14] also includes a record of *Sargassum liebmannii* var. *nicoyana*. However, Setchell (1937) [18] indicated that such differences could be attributed to intraspecific morphological variation. Interestingly, Setchell re-described *S. liebmannii* and mentioned that it had discoid holdfasts. A review of herbarium specimens from El Salvador identified as *S. liebmannii* by Dawson shows that they match the new species described in this study (*S. lacrucense*), suggesting that Setchell may have inadvertently confused the two morphotypes.

In the concatenated phylogenetic analysis, (*S. lacrucense*) is grouped within the *Sargassum* section, the same section that includes *S. liebmannii*, although in a separate clade. This clade also contains species such as *S. spinuligerum* Sonder and *S. spinuligerum* var. *crispatum* Kützing, which are distributed in the Indo-Pacific region [7, 46-47] and exhibit

some resemblance to the newly described morphotype, particularly in general thallus morphology [7]. However, these species differ notably in leaf and reproductive structure characteristics, suggesting that they are sister species rather than conspecifics of *S. lacrucense*.

Moreover, the taxonomic structure of the sections that include Gulf of California species remains partially unresolved. Although the phylogenetic tree obtained in this study supports the validity of the Lapazeanum and Herporhizum sections (in agreement with Andrade-Sorcía, 2014; Norris, 2010) [11,41], it also suggests that the Sinicola section—currently including *S. sinicola* and *S. horridum*—might also encompass *S. liebmannii*. This would contradict earlier proposals by Dawson and Norris, who placed *S. liebmannii* in Herporhizum. However, *S. liebmannii* does not fully match the morphological diagnosis of the Sinicola section, especially regarding its holdfast, and thus this section may require redefinition or the proposal of a new, closely related section.

Therefore, we propose the establishment of a new section, Herporizum/Sinicola, that integrates the previously recognized sections Herporhizum, Lapazeanum, and Sinicola, based on a combination of morphological and molecular evidence. This newly proposed section is defined by the geographic distribution of its component species, which are found exclusively in the eastern Pacific, including the Gulf of California and the tropical Pacific coasts of Mexico and Central America. Morphologically, all species within this group share several key features: leaves with dentate to serrated margins, an apparent to inconspicuous central vein, and the frequent presence of cryptostomata. Despite its morphological similarities to section Herporhizum, the overall congruence between morphological traits and genetic relationships supports the unification of these three sections into a single, coherent lineage. This pattern is consistent with other genera such as *Dictyota* and *Padina*, which also include species that have diversified exclusively in the eastern Pacific [43].

5. Conclusions

This study reduces the number of Sargassum species reported in the Pacific of Central America from four to two clearly delimited entities. It also provides the first available molecular sequences for *S. liebmannii* and for the newly described species *S. lacrucense* *sp. nov.*, representing a significant contribution to future molecular identification efforts for

macroalgae in the region. We propose a new section, Herporhizum/Sinicola, uniting the former sections Herporhizum, Lapazeanum, and Sinicola based on geographical, morphological, and molecular evidence.

Based on current records, *Sargassum liebmannii* appears to be widely distributed across the Pacific coast of Central America, with confirmed presence in Costa Rica, Panama, and Nicaragua, although no recent records were found for El Salvador. In contrast, *Sargassum lacrucense* has so far been documented in Costa Rica, Nicaragua, and El Salvador, but not in Panama. However, given the limited number of samples available for *S. lacrucense* and the uneven sampling effort across the region, this distribution patterns should be considered preliminary. Since both species can inhabit both intertidal and subtidal rocky habitats, further systematic surveys are required to confirm their actual ranges and possible occurrence in other parts of the region.

Author Contributions: Conceptualization, M.V.C. and C.F.G.; methodology, M.V.C., C.F.G. and K.G.S.; software, M.V.C.; validation, M.V.C., C.F.G. and K.G.S.; formal analysis, M.V.C.; investigation, M.V.C., C.F.G., F.Q.P., P.D.C. and K.G.S.; resources, C.F.G.; data curation, M.V.C.; writing—original draft preparation, M.V.C.; writing—review and editing, C.F.G.; visualization, M.V.C.; supervision, C.F.G.; project administration, C.F.G.; funding acquisition, C.F.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Guanacaste Dry Forest Conservation Fund and by the research projects B7-903 and C3-262 registered at CIMAR (Center for Research in Marine Sciences and Limnology), Office of the Vice-rectory for Research, University of Costa Rica.

Data Availability Statement: The datasets presented in this article are not readily available because the species described is new to science and the data will only be made publicly available once the manuscript is formally accepted for publication. We are currently awaiting the assignment of accession numbers for each DNA sequence. Requests to access the datasets

should be directed to [mariana.viales@ucr.ac.cr]. All sequences generated in this study have been deposited in GenBank under BioProject accession number SUB15398624.

Acknowledgments: We thank the administrative staff of CIMAR for their valuable support throughout this project. We are also grateful to Isabel Córdón, Kenneth Monge Barquero, Andrea Planas, Arturo Ayala, and Juan José Alvarado for their assistance in specimen collection and sample processing. And Fabián Mora Escobar for taking the photographs of the specimens in the laboratory. This research was conducted under the following research and collection permits: [R-SINAC-ACG-PI-022-2018,N°R-SINAC-ACG-PI-038-2021,N° R-SINAC-ACG-PI-019-2023, R-SINAC-ACG-PI-041-2024] in Costa Rica, [DGPN/DB/DAB-IC-0004-2009] in Nicaragua, [AIMA-01-2009] in El Salvador, and [permit number] in Panama. During the preparation of this manuscript, the authors used AI to assist in translating the original Spanish version of the text into English. The authors have reviewed and edited the output and take full responsibility for the content of this publication.

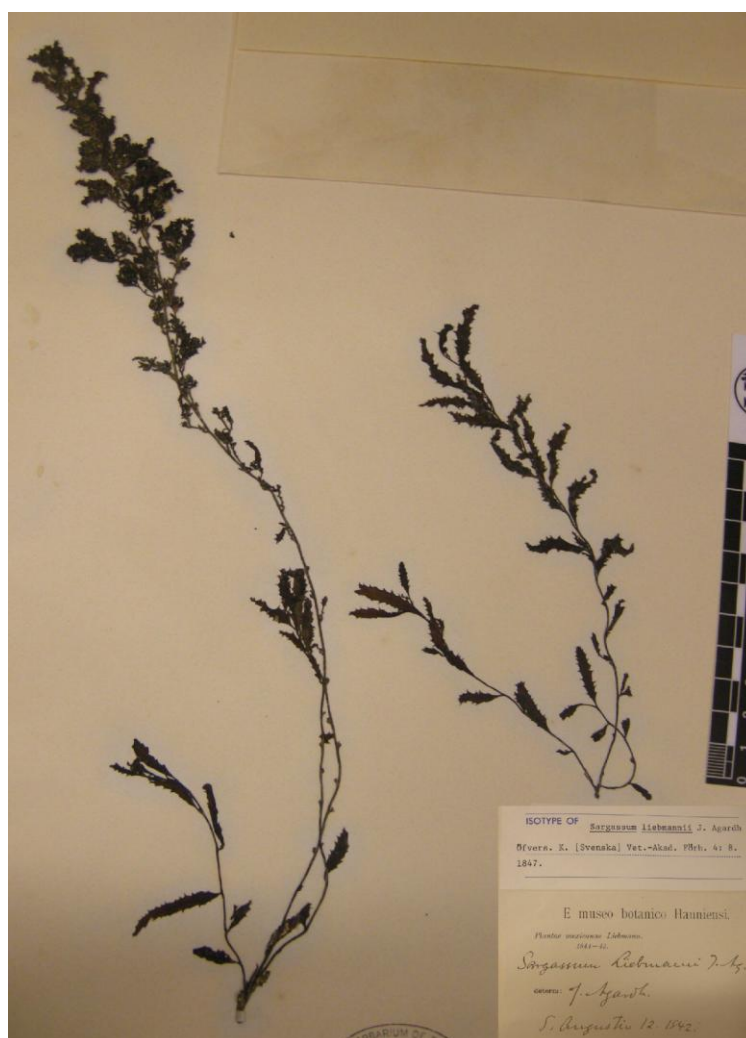
Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

following abbreviations are used in this manuscript:

MICH	University of Michigan Herbarium
UC	The University Herbarium of California, Berkeley
USJ	University of Costa Rica Herbarium, Dr. Luis A. Fournier Origgí
CIBET	Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical
CIMAR	Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad de Costa Rica

Appendix A



Appendix 1. Figure A1. Isotype of *Sargassum liebmannii* from San Agustín, Mexico. Herbarium specimen housed at the University Herbarium, University of California, Berkeley (UC), scale bar in cm.

Appendix B

Appendix 2. Table B1. GenBank accession numbers for taxa included in the phylogenetic reconstruction of the genus *Sargassum*

Taxon	COX3	ITS2
<i>Cystophora retroflexa</i>	JN654446	GU289346
<i>Sargassum hystrix</i>	KP064338	KM461676
<i>Sargassum howeanum</i>	FJ170413	FJ170438
<i>Sargassum aquifolium</i>	JN243775	EU833429
<i>Sargassum brandegeei</i>	JX560119	JX560132
<i>Sargassum carpophyllum</i>	EU833417	EU100797
<i>Sargassum decurrens</i>	EU100822	EU882257

<i>Sargassum echinocarpum</i>	EU100835	EU100795
<i>Sargassum fallax</i>	JN243781	JN243809
<i>Sargassum filicinum</i>	JF931740	AB043108
<i>Sargassum fluitans</i>	KP064335	KM461674
<i>Sargassum fusiforme</i>	JF931743	JF931859
<i>Sargassum herporhizum</i>	JX560118	JX560130
<i>Sargassum horneri</i>	AB430581	AB043680
<i>Sargassum horridum</i>	JX560120	JX560122
<i>Sargassum ilicifolium</i>	EU833391	EU882249
<i>Sargassum johnstonii</i>	JX560116	JX560129
<i>Sargassum lapazeanum</i>	JX560117	JX560125
<i>Sargassum macrocarpum</i>	JF931748	KY935429
<i>Sargassum mcclurei</i>	KY935444	AB043111
<i>Sargassum micracanthum</i>	JF931752	KY935431
<i>Sargassum miyabei</i>	JF931753	AY150007
<i>Sargassum natans</i>	KP064340	KM461678
<i>Sargassum obtusifolium</i>	EU100831	EU100785
<i>Sargassum pacificum</i>	EU100828	EU100774
<i>Sargassum patens</i>	JF931758	AB043666
<i>Sargassum piluliferum</i>	JF931760	AB043617
<i>Sargassum polycystum</i>	EU833405	OK041991
<i>Sargassum polyphyllum</i>	EU833402	EU833424
<i>Sargassum siliquastrum</i>	JF931765	JF931843
<i>Sargassum sinclairii</i>	KF281971	FJ170458
<i>Sargassum sinicola</i>	JX560121	JX560124
<i>Sargassum spinuligerum</i>	JN243785	FJ170460
<i>Sargassum spinuligerum</i> var. <i>crispata</i>	FJ170429	FJ170463
<i>Sargassum swartzii</i>	KF281820	EU882254
<i>Sargassum thunbergii</i>	JF931766	JF931858
<i>Sargassum turbinarioides</i>	EU882245	EU882256
<i>Sargassum vulgare</i>	KJ572507	KJ572480
<i>Sargassum yamadae</i>	JF931767	AB043561
<i>Sargassum yendoii</i>	JF931771	AB043667

References

1. Phillips, N. Biogeography of Sargassum (Phaeophyta) in the Pacific basin. In *Taxonomy of Economic Seaweeds with Reference to Some Pacific Species*; Abbott, I.A., Ed.; California Sea Grant College Program: La Jolla, CA, USA, 1995; Volume 5, pp. 107–144.
2. Thibaut, T.; Pinedo, S.; Torras, X.; Ballesteros, E. Long-term decline of the populations of Fucales (*Cystoseira* spp. And *Sargassum* spp.) in the Albères coast (France, Northwestern Mediterranean). *Mar. Pollut. Bull.* 2005, *50*, 1472–1489. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.014>
3. Mattio, L.; Payri, C.E. 190 years of *Sargassum* taxonomy, facing the advent of DNA phylogenies. *Bot. Rev.* 2011, *77*, 31–70. <https://doi.org/10.1007/s12229-010-9060-x>
4. Mattio, L.; Payri, C.E.; Verlaque, M. Taxonomic Revision and Geographic Distribution of the Subgenus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) in the Western and Central Pacific Islands Based on Morphological and Molecular Analyses. *J. Phycol.* 2009, *45*, 1213–1227. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2009.00737.x>
5. Mattio, L.; Payri, C.E.; Verlaque, M.; de Reviere, B. Taxonomic revision of *Sargassum* sect. *Acanthocarpicae* (Fucales, Phaeophyceae). *Taxon* 2010, *59*, 896–904. <https://doi.org/10.1002/tax.593017>
6. Guiry, M.D.; Guiry, G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. Available online: <https://www.algaebase.org> (accessed on 25 January 2025).
7. Andrade-Sorcía, G.; Riosmena-Rodríguez, R.; Muñiz-Salazar, R.; López-Vivas, J.M.; Boo, G.H.; Lee, K.M.; Boo, S.M. Morphological reassessment and molecular assessment of *Sargassum* (Fucales: Phaeophyceae) species from the Gulf of California, Mexico. *Phytotaxa* 2014, *183*, 201–223. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.183.4.1>
8. Chase, M.W.; Cowan, R.S.; Hollingsworth, P.M.; Van Den Berg, C.; Madriñán, S.; Petersen, G.; Wilkinson, M. A proposal for a standardised protocol to barcode all land plants. *Taxon* 2007, *56*, 295–299. <https://doi.org/10.1002/tax.562004>
9. Alshehri, M.A.; Aziz, A.T.; Alzahrani, O.; Alasmari, A.; Ibrahim, S.; Osman, G.; Bahattab, O. DNA-barcoding and Species Identification for Some Saudi Arabia Seaweeds using rbcL Gene. *J. Pure Appl. Microbiol.* 2019, *13*, 2249–2255. <https://doi.org/10.22207/JPAM.13.4.15>
10. Fernández-García, C.; Riosmena-Rodríguez, R.; Wysor, B.; Tejada, O.; Cortés, J. Checklist of the Pacific Marine Macroalgae of Central America. *Bot. Mar.* 2011, *54*, 53–73. <https://doi.org/10.1515/bot.2011.001>
11. Cortés, J.; Samper-Villarreal, J.; Bernecker, A. Seasonal phenology of *Sargassum liebmannii* J. Agardh (Fucales, Heterokontophyta) in an upwelling area of the Eastern Tropical Pacific. *Aquat. Bot.* 2014, *119*, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.08.009>
12. Alvarado, J.J.; Beita-Jiménez, A.; Mena, S.; Fernández-García, C.; Cortés, J.; Sánchez-Noguera, C.; Jiménez, C.; Guzmán-Mora, A.G. Cuando la conservación no puede seguir el ritmo del desarrollo: Estado de salud de los ecosistemas coralinos del Pacífico Norte de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 2018, *66*(S1), S280–S308. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33300>
13. Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). *Identificación y análisis de sitios de importancia para la conservación y el manejo en ambientes marino-costeros y oceánicos de Costa Rica (Grúas III – Volumen III)*; Proyecto Post 2020 Biodiversity Framework – EU Support and Asociación Costa Rica por Siempre: San José, Costa Rica, 2024; 192p.
14. Setchell, W.A.; Gardner, N.L. The Templeton Crocker Expedition of the California Academy of Sciences: A Preliminary Report on the Algae. *Proc. Calif. Acad. Sci.* 1937, *22*, 65–98.
15. Dawson, E.Y. The marine algae of the Gulf of California. *Allan Hancock Pac. Exped.* 1944, *3*, 189–452.

16. Taylor, W.R. Pacific marine algae of the Allan Hancock Expeditions to the Galapagos Islands. *Allan Hancock Pac. Exped.* 1945, 12, 1–130.
17. Dawson, E.Y. Plantas marinas de la zona de las mares de El Salvador. *Pac. Nat.* 1961, 2, 388–461.
18. Dawson, E.Y. Additions to the marine flora of Costa Rica and Nicaragua. *Pac. Nat.* 1962, 3, 392–394.
19. Fernández-García, C. (Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica). Personal communication, 2022.
20. Schneider, C.A.; Rasband, W.S.; Eliceiri, K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods* 2012, 9, 671–675. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/14.9.817>
21. Goff, L.J.; Moon, D.A.; Coleman, A.W. Molecular Delineation of Species and Species Relationships in the Red Algal Agarophytes Gracilariopsis and Gracilaria (Gracilariales). *J. Phycol.* 1994, 30, 521–537. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1994.00521.x>
22. Kogame, K.; Masuda, M. Crustose sporophytes of *Colpomenia bullosa* (Scytosiphonaceae, Phaeophyceae) in nature. *Cryptogam. Algol.* 2001, 22, 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0181-1568\(01\)01064-9](https://doi.org/10.1016/S0181-1568(01)01064-9)
23. Kogame, K.; Uwai, S.; Shimada, S.; Masuda, M. A study of sexual and asexual populations of *Scytosiphon lomentaria* (Scytosiphonaceae, Phaeophyceae) in Hokkaido, northern Japan, using molecular markers. *Eur. J. Phycol.* 2005, 40, 313–322. <https://doi.org/10.1080/09670260500193008>
24. Katoh, K.; Rozewicki, J.; Yamada, K.D. MAFFT online service: multiple sequence alignment, interactive sequence choice and visualization. *Brief. Bioinform.* 2019, 20, 1160–1166. <https://doi.org/10.1093/bib/bbx108>
25. Tamura, K.; Stecher, G.; Kumar, S. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Mol. Biol. Evol.* 2021, 38, 3022–3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
26. Castresana, J. Selection of conserved blocks from multiple alignments for their use in phylogenetic analysis. *Mol. Biol. Evol.* 2000, 17, 540–552. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a026334>
27. Posada, D.; Crandall, K.A. MODELTEST: testing the model of DNA substitution. *Bioinformatics* 1998, 14, 817–818.
28. Felsenstein, J. Evolutionary trees from DNA sequences: A maximum likelihood approach. *J. Mol. Evol.* 1981, 17, 368–376. <https://doi.org/10.1007/BF01734359>
29. Edler, D.; Klein, J.; Antonelli, A.; Silvestro, D. raxmlGUI 2.0: a graphical interface and toolkit for phylogenetic analyses using RAxML. *Methods Ecol. Evol.* 2021, 12, 373–377. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13512>
30. Letunic, I.; Bork, P. Interactive Tree of Life (iTOL) v6: recent updates to the phylogenetic tree display and annotation tool. *Nucleic Acids Res.* 2024, 52, W78–W82. <https://doi.org/10.1515/bot-2015-0001>
31. Setchell, W.A.; Gardner, N.L. The Marine Algae, in Expedition of the California Academy of Sciences to the Gulf of California in 1921. *Proc. Calif. Acad. Sci.* 1924, 12, 695–949.
32. Norris, J.N. Marine algae of the North Gulf of California: Chlorophyta and Phaeophyceae. *Smithson. Contrib. Bot.* 2010, 94, 1–276.
33. Fernández-García, C. Taxonomy and biogeography of the families Caulerpaceae (Chlorophyta), Dictyotaceae (Ochrophyta) and Corallinaceae (Rhodophyta) in the Pacific of Central America. Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, Mexico, 2012.
34. Agardh, J.G. *Nya alger från Mexico*. Öfvers. Kongl. Vetensk.-Akad. Förh. 1847, 4, 5–17.
35. Jung-Kim, H.W.; Hernández-Herrera, R.M.; Enciso-Padilla, I.; Torres-Morán, M.I.; Velasco-Ramírez, A.P. Genetic variability of *Sargassum liebmannii* on the coast of Jalisco in the central Mexican Pacific revealed by molecular markers and morphological traits. *Electron. J. Biotechnol.* 2021, 54, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.08.003>

36. Atmadja, W.S.; Prud'homme van Reine, W.F. *Checklist of the Seaweed Species Biodiversity of Indonesia: With Their Distribution and Classification: Green Algae (Chlorophyta) and Brown Algae (Phaeophyceae, Ochrophyta)*. Indonesian Institute of Sciences (LIPI): Jakarta, Indonesia, 2014.
37. Kokabi, M.; Yousefzadi, M. Checklist of the marine macroalgae of Iran. *Bot. Mar.* 2015, *58*, 307–320.

CAPÍTULO 2. Revisión sistemática de los usos de las especies y compuestos del género *Sargassum* (Sargassaceae)

En formato de artículo científico para publicación en la Revista de Biología Tropical

Revisión sistemática de los usos de las especies y compuestos del género *Sargassum* (Sargassaceae)

Mariana Viales Cubillo^{1,3};
Alejandro H. Buschmann⁴;
German Madrigal Redondo⁵;
Cindy Fernández-García^{1,2};

1 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica.

2 Escuela de Biología Universidad de Costa Rica.

3 Posgrado de Biología Universidad de Costa Rica.

4 Centro i-mar y CeBiB, Universidad de Los Lagos

5 Facultad de Farmacia, Instituto de Investigaciones Farmacéuticas, Universidad de Costa Rica.

ABSTRACT

Introduction: *Sargassum* is a genus of brown macroalgae known for its high diversity and capacity to produce a wide range of bioactive metabolites. Its biotechnological potential has gained attention, especially due to the environmental impact of massive strandings in the Caribbean and other regions, driving interest in sustainable utilization. **Objective:** To conduct a systematic review of scientific literature from 2013 to 2024 on compounds found in *Sargassum* species and their potential applications, aiming to establish a solid basis for sustainable use. **Methods:** A comprehensive search was carried out in Scopus, ScienceDirect, and Latindex databases, following PRISMA guidelines. A total of 841 articles meeting specific inclusion criteria were selected and analyzed using RStudio with statistical and graphical tools. **Results:** Most studies originated from Asia, reflecting both traditional medicinal use and large-scale availability. Predominant applications were biomedical (antioxidant, anticancer, antidiabetic, anti-inflammatory), followed by cosmetic, agricultural, food, biomaterial, energy, and environmental uses. The most frequently reported compounds were polysaccharides such as fucoidan and laminarin, and aqueous or ethanolic extracts. The most studied species included *S. fusiforme*, *S. muticum*, *S. wightii*, *S. horneri*, and *S. polycystum*. **Conclusions:** *Sargassum* is a promising biological resource for multiple industries. However, further research is needed on safety, toxicity, and traceability to ensure its safe application, particularly in human and animal products. This review provides a comprehensive framework for advancing research and supporting the sustainable valorization of *Sargassum*, aligned with sustainable development goals and the bioeconomy.

Key words: Secondary metabolites, industrial applications, bioprospecting, natural extracts, biotechnological innovation.

RESUMEN

Introducción: *Sargassum* es un género de macroalgas pardas reconocido por su alta diversidad morfológica y por producir una gran variedad de metabolitos bioactivos. Su potencial biotecnológico ha cobrado relevancia en los últimos años, especialmente ante la problemática ambiental generada por las arribaciones masivas en el Caribe y otras regiones, lo cual ha impulsado el interés científico en su valorización. **Objetivo:** Realizar una revisión

sistemática de la literatura científica publicada entre 2013 y 2024 sobre los compuestos presentes en especies del género *Sargassum* y sus aplicaciones potenciales, con el fin de sentar una base sólida para su aprovechamiento sostenible. **Métodos:** Se consultaron las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Latindex, utilizando la guía PRISMA para filtrar artículos que cumplieran criterios de inclusión específicos. Se seleccionaron 841 artículos que fueron analizados en RStudio mediante herramientas gráficas y estadísticas. **Resultados:** La mayoría de estudios provienen de Asia, donde existe una tradición de uso medicinal de estas algas. Las aplicaciones más comunes fueron biomédicas (antioxidantes, anticancerígenas, antidiabéticas, antiinflamatorias), seguidas de usos en cosmética, agricultura, alimentos, biomateriales, energía y remediación ambiental. Los compuestos más frecuentes fueron polisacáridos como fucoidano y laminarinan, además de extractos acuosos y etanólicos. Las especies más estudiadas fueron *S. fusiforme*, *S. muticum*, *S. wightii*, *S. horneri* y *S. polycystum*. **Conclusiones:** El género *Sargassum* representa una fuente prometedora de compuestos funcionales para diversas industrias. Sin embargo, se requiere avanzar en estudios de inocuidad, toxicidad y trazabilidad para garantizar su uso seguro, especialmente en productos de consumo humano y animal. Esta revisión aporta un marco integral para fomentar la investigación y valorización sostenible del sargazo, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y la bioeconomía.

Palabras clave: Metabolitos secundarios, aplicaciones industriales, bioprospección, extractos naturales, innovación biotecnológica.

Total de palabras: 7279

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los organismos marinos han comenzado a ser considerados como biofábricas productoras de metabolitos con diversas propiedades bioactivas (Guillerme & Coiffard, 2017; Karthikeyan et al., 2022). Dentro de este grupo, las macroalgas marinas llaman la atención de los investigadores debido a que presentan una gran cantidad de metabolitos y muchos de ellos no se encuentran en ningún otro grupo de organismos (Collins et al., 2016; Kammler et al., 2024). Estas moléculas incluyen tanto metabolitos secundarios como primarios y pueden tener aplicaciones en diversos sectores como la industria de la salud (Kurinjeri & Kulanthaiyesu, 2022; S'thandiwe et al., 2024), cosmética (Hu et al., 2022; Cao et al., 2024), agrícola (Vijayanand et al., 2014; de Carvalho et al., 2019) y alimenticia (Shitole et al., 2014; Hanjabam et al., 2017), entre otras.

Las principales macroalgas marinas se clasifican en los filos de algas rojas (Rhodophyta), verdes (Chlorophyta) y pardas (Ochrophyta-Phaeophyceae) (Graham & Wilcox, 2000). Cada grupo presenta una composición química particular, lo que conlleva a diferentes propiedades bioactivas (Barsanti & Gualtieri, 2005). En el caso de las algas

pardas, se distinguen por la presencia de polisacáridos como el alginato, la laminarina y los fucoidanos (Baba et al., 2018), así como por diversos compuestos fenólicos como los florotaninos (Mateos & Domínguez, 2020).

Dentro de las algas pardas, el género *Sargassum* (Orden Fucales) es el más diverso dentro del orden Fucales y se caracteriza por ser uno de los que presenta mayor variación a nivel morfológico (Guiry & Guiry, 2010; Mattio & Payri, 2011). Está presente en todas las zonas costeras del mundo; sin embargo, su mayor diversidad se da tanto en regiones tropicales como intertropicales. Cuenta con aproximadamente 615 especies descritas (Guiry & Guiry, 2025) y comprende tanto especies bentónicas como flotantes (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Estas últimas comprenden un número limitado de especies flotantes (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*) que usualmente se concentran en el mar de los Sargazos ubicado en el océano Atlántico Norte (Hu et al., 2016; Monroy-Velázquez et al., 2019).

A pesar de que el mar de los Sargazos es un ecosistema flotante que representa una fuente de alimento, refugio y espacio de crianza para diversas especies (Sissini et al., 2017; Thompson et al., 2020), en la última década las arribazones masivas de *Sargassum* pelágico han provocado una crisis socioeconómica y ambiental tanto en el Caribe como en África occidental (Wang et al., 2019). Se ha propuesto que esta acumulación inusual se origina en una nueva zona de crecimiento en el Atlántico tropical sur, alimentada por el aumento de nutrientes provenientes del Amazonas, el Congo y la actividad antropogénica en África occidental. Desde allí, las corrientes oceánicas transportan los bancos de sargazo hacia el norte, llegando al Caribe y al Golfo de México, donde se acumulan en grandes cantidades (Wang et al., 2019). Adicionalmente, *Sargassum muticum*, una especie originaria del Pacífico noroccidental, ha causado desequilibrios ecológicos en las costas europeas, donde es considerada una especie invasora debido a su rápida propagación y su capacidad para desplazar la flora local (Critchley et al., 1990; Stæhr et al., 2000; Hanif & Idrissi, 2014). Frente a estos desafíos, ha surgido un creciente interés por estudiar la composición química de estas algas para encontrar posibles aplicaciones y así aprovechar de manera sostenible estos recursos.

Asimismo, cabe destacar que varias especies de *Sargassum* (*Sargassum fusiforme* y *Sargassum pallidum*) han sido utilizadas como componentes de la medicina natural asiática desde tiempos antiguos (Xiu et al., 2017), por lo que no es de extrañar que, en la actualidad,

los investigadores científicos han comenzado a revelar una amplia gama de compuestos bioactivos presentes en este género que poseen propiedades bioactivas como antioxidantes, antiinflamatorias y antibacteriales, entre otras (Balboa et al., 2013; Albratty et al., 2021; Shin et al., 2024). Esto convierte a *Sargassum* en un recurso biológico con alto potencial, especialmente en el marco de la década de los océanos, ya que los objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas (2018), y específicamente su objetivo 14 (vida submarina), corresponden a posibles utilidades de los recursos marinos para el desarrollo sostenible.

Por lo tanto, el objetivo de esta revisión sistemática es recopilar, clasificar y analizar los compuestos identificados en especies del género *Sargassum*, así como sus posibles aplicaciones, con el fin de proporcionar una base científica para futuras investigaciones y para el manejo de estas especies.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de búsqueda: Se realizó una revisión de artículos publicados desde enero del 2013 hasta diciembre del 2024. Se utilizaron 3 bases de datos electrónicas: Scopus, ScienceDirect y Latindex. Las palabras claves utilizadas en los buscadores fueron: chemical AND applications” AND *Sargassum* OR Sargazo.

Se utilizó la guía de PRISMA (Liberati et al. 2009) para elaborar la estrategia de búsqueda. Con el algoritmo de búsqueda utilizado se descargaron todos los resultados obtenidos, se colocaron en una matriz y se identificaron por código, título y año de publicación. Se descartaron los artículos repetidos. Al título y al resumen de los artículos resultantes se les aplicaron criterios de selección (Cuadro 1) y se eliminaron aquellos que no los cumplían. Posteriormente, dichos criterios fueron aplicados al texto completo de los artículos restantes. Por último, se extrajo la información pertinente de los artículos seleccionados.

Criterios de exclusión e inclusión

Los artículos incluidos poseían las siguientes características:

- Fueron publicados en inglés, español o francés.
- Incluían una posible aplicación.
- Especificaban la especie que se utilizó.
- Fueron publicados en revistas indexadas.
- Indicaban el sitio donde se colectó la especie.
- Indicaban el compuesto o extracto utilizado.

- Que fueran artículos de investigación.

Las revisiones, los comunicados cortos, las cartas de opinión y los meta análisis fueron excluidos, al igual que los libros de congresos.

De los artículos aceptados se extrajo la siguiente información:

- Taxonomía (Filo, Clase, Orden, Familia, Género y Especie).
- Tipo de aplicaciones.
- Año de publicación.
- Compuesto o fracción utilizado.
- Localización geográfica donde se realizó el estudio.

Análisis de datos: El análisis de los datos recolectados se llevó a cabo utilizando el entorno estadístico RStudio (versión 4.3.2). Para la exploración y visualización de los patrones presentes en la base de datos se aplicaron análisis descriptivos y exploratorios, mediante herramientas gráficas y tabulares, con el objetivo de sintetizar la información y facilitar su interpretación.

Se generaron mapas de distribución geográfica para identificar las regiones con mayor concentración de estudios. Se realizaron análisis de frecuencia mediante conteos e histogramas para evaluar la representación de distintas variables, como el tipo de compuestos bioactivos reportados, las especies estudiadas, las aplicaciones identificadas por especie y la distribución de especies por océano. Asimismo, se construyó una red de co-ocurrencia entre

tipos de compuestos y aplicaciones utilizando matrices de adyacencia, con el fin de visualizar las asociaciones más frecuentes entre metabolitos y sus usos potenciales.

Además, se emplearon mapas de calor (heatmaps) para detectar patrones de presencia/ausencia o frecuencia relativa entre tipos de aplicaciones, países y compuestos estudiados, y se organizaron los datos en tablas de resumen que permitieron identificar las especies más relevantes y los compuestos más comunes en la literatura.

RESULTADOS

Selección de estudios: De un total de 5593 artículos, 870 fueron elegidos por el análisis de título y resumen. Luego de esto se realizó la revisión del texto completo de cada artículo y se excluyeron 29 por las siguientes razones: no se mencionaba el sitio de colecta de los especímenes utilizados (n=12), se realizaba la caracterización química pero no se mencionaban posibles aplicaciones (n=17). Finalmente se aceptó un total de 841 publicaciones que cumplían con todos los criterios de inclusión de esta revisión sistemática (Fig.1).

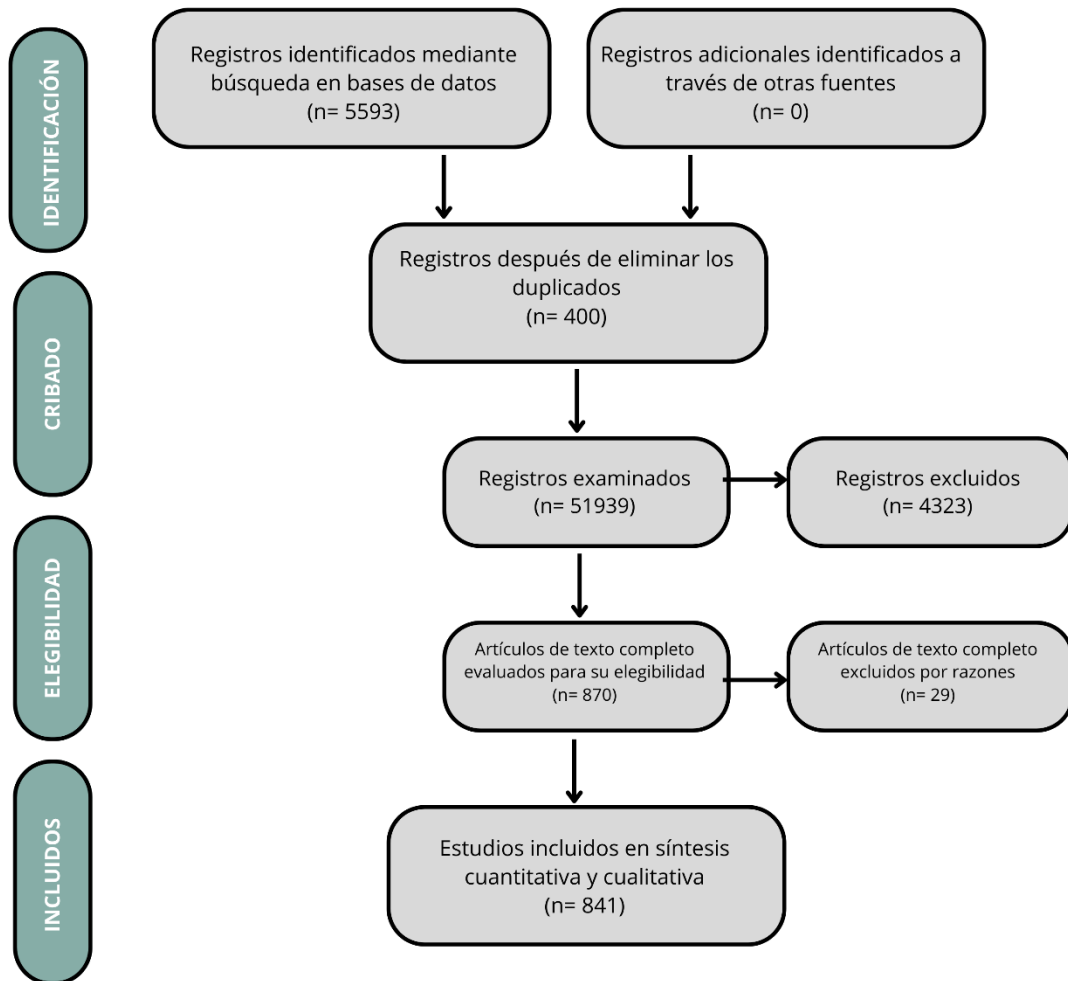


Fig. 1. Diagrama de flujo sobre la estrategia de búsqueda de artículos de *Sargassum*

El mayor número de artículos fue publicado en 2024. De manera general, se observa una tendencia ascendente en la cantidad de publicaciones a lo largo del tiempo (Fig. 2). Entre 2013 y 2019, el número de publicaciones se mantuvo relativamente constante, mientras que a partir del 2020 se registró un aumento considerable. Este incremento podría estar relacionado con el creciente interés científico en torno al fenómeno de las arribazones masivas de *Sargassum* pelágico en el Caribe y el Atlántico tropical, el cual ha cobrado visibilidad global por sus impactos ambientales, sociales y económicos. Además, el año 2020 coincidió con la pandemia por COVID-19, un periodo en el que se intensificó la producción científica a nivel mundial, lo que pudo haber contribuido al aumento en el número de publicaciones sobre este tema.

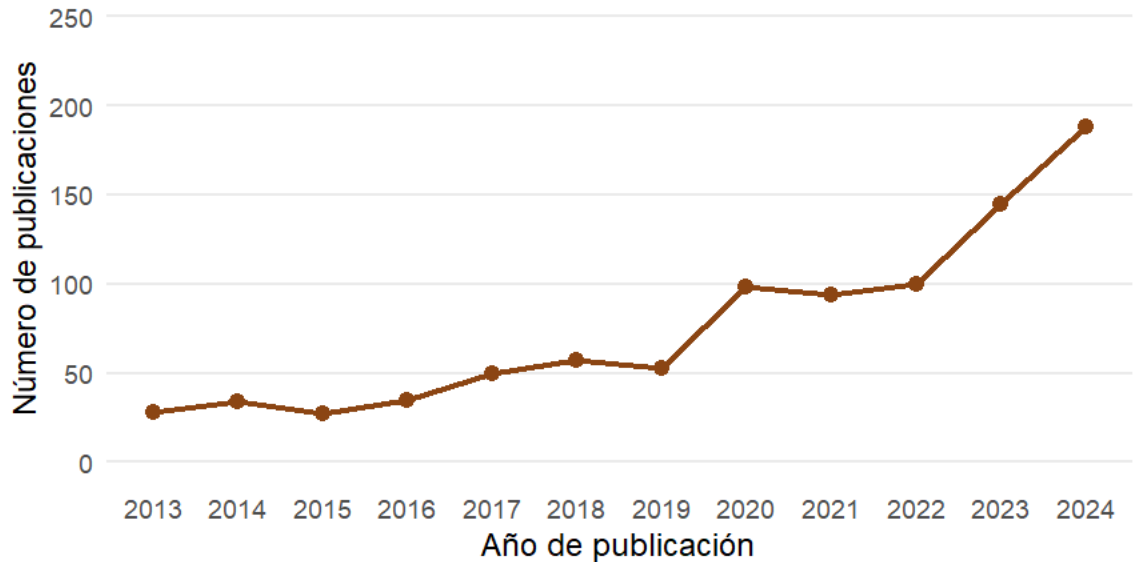


Fig. 2. Tendencia temporal de las publicaciones sobre usos de *Sargassum* entre 2013 y 2024

Distribución geográfica: En su mayoría los estudios fueron realizados en Asia, seguido de América y Europa. Los estudios asiáticos se llevaron a cabo en 18 países diferentes. Con respecto a los de los continentes americano y europeo, ambos se llevaron a cabo en 9 países. En cuanto a los estudios africanos la mayoría provenían de Egipto y, finalmente, en Oceanía los estudios se realizaron en Australia y en la isla de Tuvalu. En esta última, se reportó en 2011 una proliferación repentina de un alga filamentosa en la laguna de Fongafale, la isla principal del atolón de Funafuti. Posteriormente, en 2012, dicha proliferación fue *Sargassum polycystum*, cuya acumulación fue tan extensa que se necesitaron al menos 30 camiones para retirarla de las playas. (N'Yeurt & Iese, 2015) (Fig. 3). Adicionalmente, el océano de donde provinieron la mayoría de las especies utilizadas en las investigaciones fue el Índico, seguido del Pacífico y luego del Atlántico (Fig. 4).

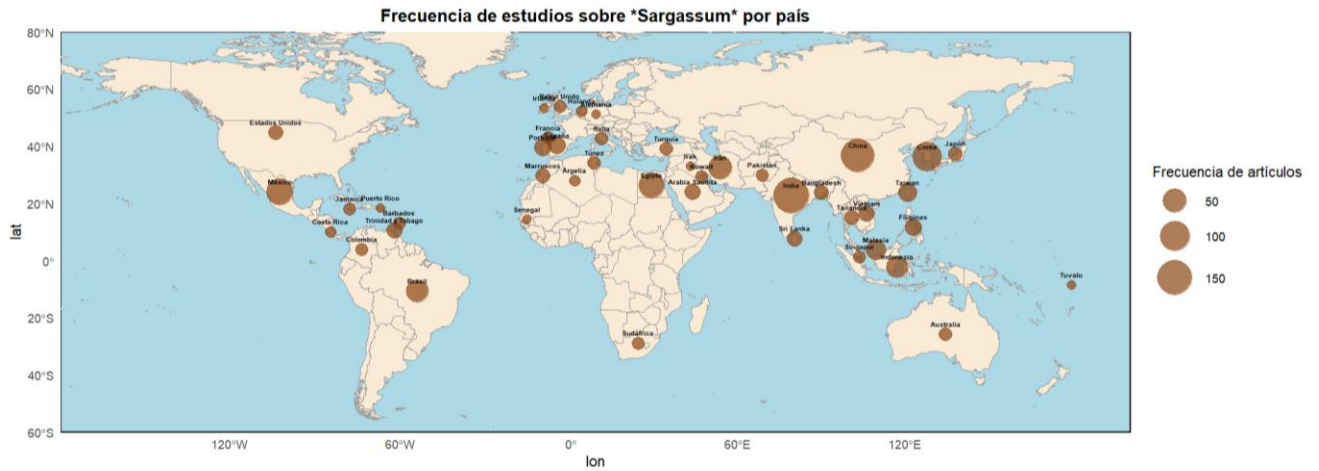


Fig. 3. Distribución geográfica de los estudios sobre usos de *Sargassum* por país

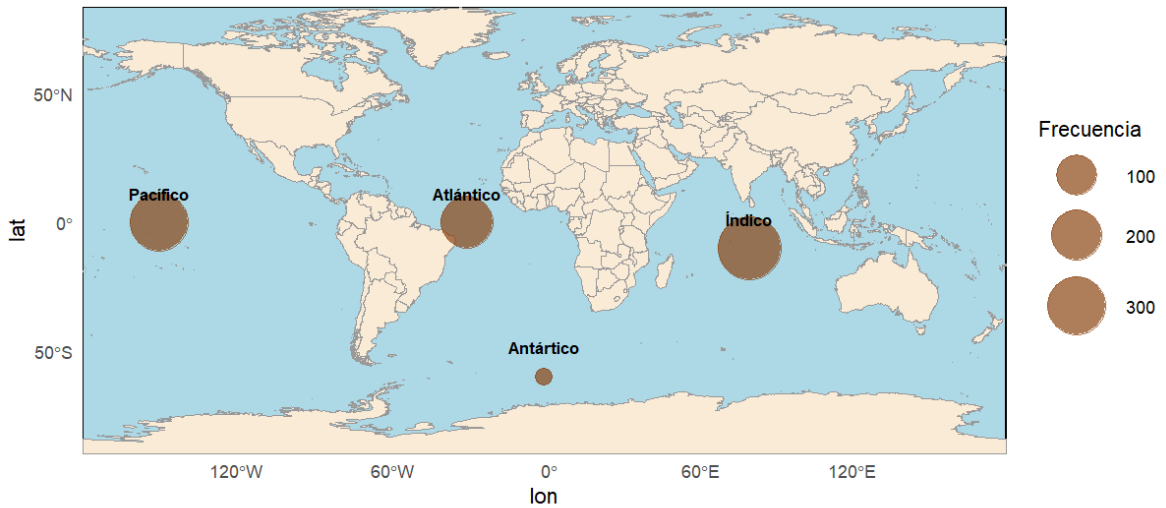


Fig. 4. Distribución geográfica de estudios sobre usos de *Sargassum* por océano

Tipos de aplicaciones: La aplicación que se encontró con más frecuencia fue la antioxidante; sin embargo, si todas las aplicaciones con efectos médicos se sumarán, el mayor tipo de aplicaciones sería el médico (Fig 5). Con respecto a la tendencia de aplicaciones a lo largo del tiempo, se puede ver una diversificación progresiva en los tipos de aplicaciones: en los primeros años de esta revisión, los estudios se enfocaban principalmente en aplicaciones

antioxidantes y agrícolas, mientras que a partir del 2020 se puede observar un aumento considerable en las aplicaciones biomédicas (anticancerígenas, antiinflamatorias), así como en nuevas tecnologías para el desarrollo de biomateriales o nanopartículas (Fig. 6).

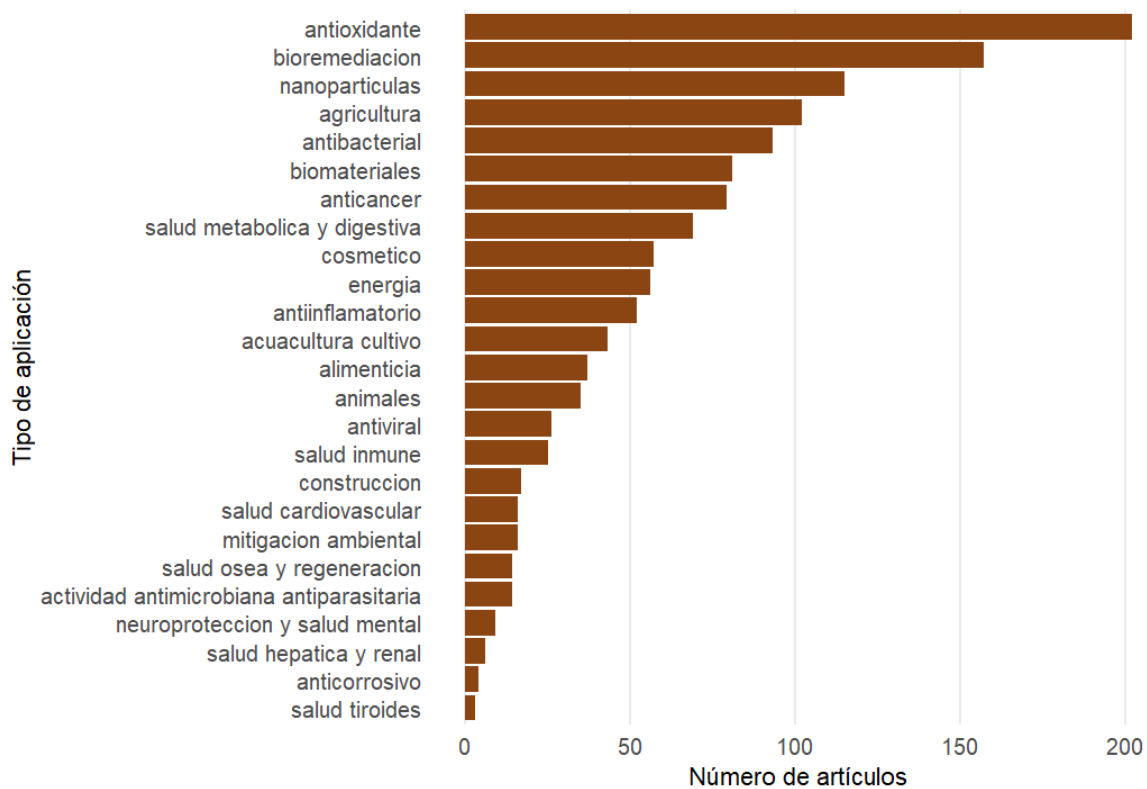


Fig. 5. Distribución de los tipos de aplicaciones de compuestos derivados del Sargazo en los artículos incluidos en la revisión

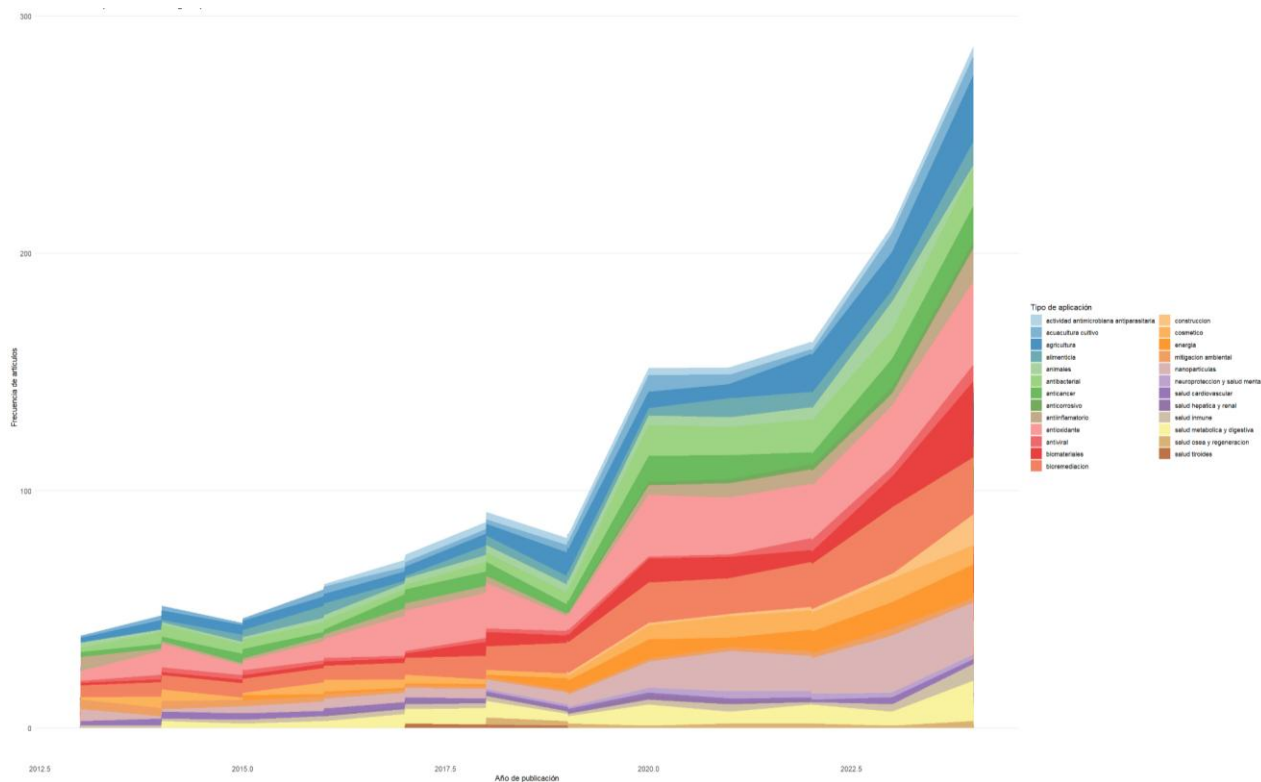


Fig. 6. Distribución temporal de las aplicaciones del sargazo en la literatura científica entre 2013 y 2024

Tipos de compuestos: El tipo de componentes más utilizados para el aprovechamiento de las algas fueron los polisacáridos; entre ellos, el que más destacó fue el fucoidan (Fig. 7). A pesar de esto, se encontró una gran diversidad de metabolitos tanto primarios como secundarios (Cuadro 1). Para las aplicaciones donde no se especificaba el compuesto, el extracto más utilizado fue el acuoso (Fig. 7); sin embargo, también se emplearon diversos tipos de extractos, tanto polares como no polares. Los extractos polares, como los acuosos, metanólicos y etanólicos, tienden a extraer compuestos hidrofílicos como polisacáridos y compuestos fenólicos; mientras que los no polares, como los hexánicos o cloroformicos, permiten recuperar lípidos o terpenoides. También se reportaron otros extractos obtenidos mediante tecnologías innovadoras, como la extracción asistida por ultrasonido o microondas (Cuadro II).

Finalmente, se observó que algunos compuestos y extractos, como el fucoidano o los extractos acuosos, fueron utilizados en múltiples aplicaciones (por ejemplo, antioxidante, antimicrobiana o anticancerígena) (Fig. 8).

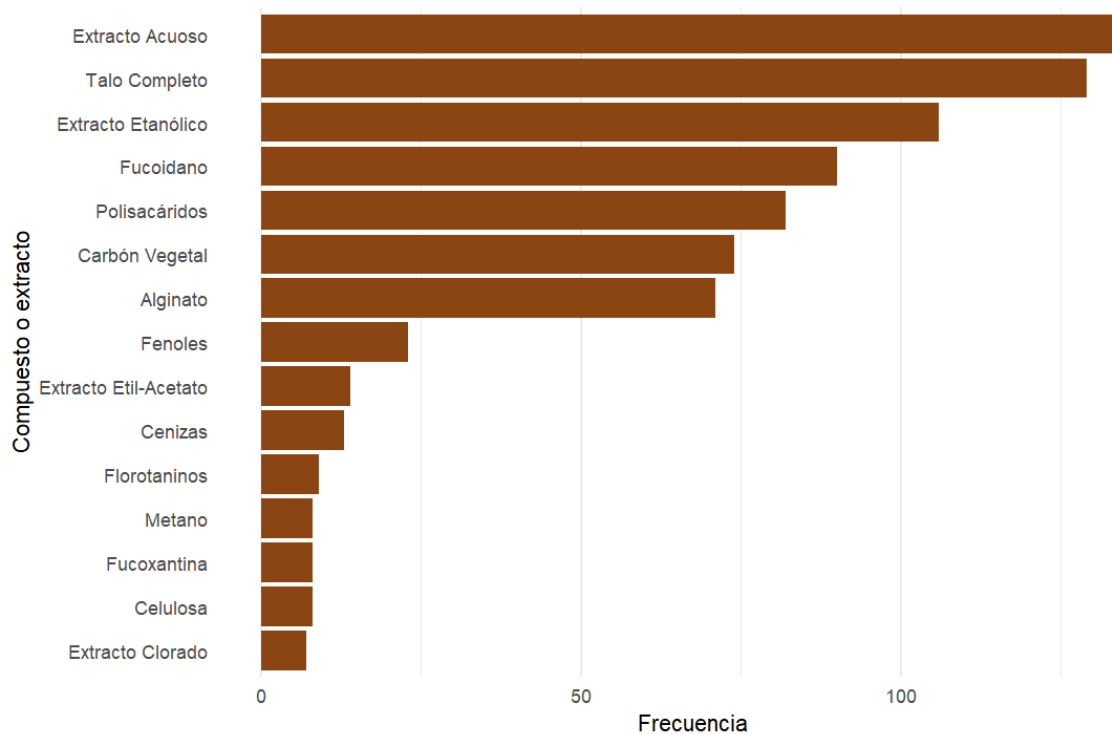


Fig. 7. 15 principales categorías de compuestos y extractos utilizados en las investigaciones sobre aplicaciones de *Sargassum*.

Estas categorías agrupan los tipos de compuestos más frecuentemente utilizados. En algunos casos (p. ej. “polisacáridos”), se incluyen varios compuestos con estructuras distintas. En el Cuadro 1 se detallan los nombres específicos y sus monómeros constituyentes, cuando fue posible.

Cuadro 1. Tipos de compuestos químicos utilizados en los 841 artículos aceptados

Compuesto	Composición	Tipo de metabolito
Isonahocol E3	-	Secundario (fitoesterol)
Poligalacto-fucopiranososa	Galactosa, fucosa	Secundario (polisacárido)
2-O-eicosanoyl-3-O-(6-amino-6-deoxy)- β -D-glucopyranosyl-glycerol	Glucosa	Secundario (glicolípido)
Ácido linoleico	-	Primario (ácido graso)

Ácido oleico	-	Primario (ácido graso)
Ácido erúcico	-	Primario (ácido graso)
Hidrocarburos alifáticos	-	Primario (lípidos)
Ácido 9-hidroxihexadecanoico	-	Primario (ácido graso)
Alginato	ácido gulurónico, ácido manurónico	Primario (polisacárido)
Ácido palmitoleico	-	Primario (ácido graso)
Ácido polimanurónico	Ácido manurónico	Primario (polisacárido)
Ácido sargahidroquinónico	-	Secundario (polifenol)
Ácido sargaquinoico	-	Secundario (polifenol)
Ácido mirístico	-	Primario (ácido graso)
Aril-policétido	-	Secundario (polifenol)
Betulina	-	Triterpeno
Hidrógeno	-	Compuesto simple
Carbón vegetal	-	Compuesto simple
Carotenoide	-	Secundario (terpenoide)
Celulosa	Glucosa	Primario (polisacárido)
Cenizas	Minerales	Compuesto inorgánico
Clorofila a	-	Primario (pigmento)
Clorofila C2	-	Primario (pigmento)
Compost	Materia orgánica descompuesta	-
Etanol		Primario (alcohol)
Farnesilacetona	-	Secundario (sesquiterpeno)
Estilbenos	-	Secundario (polifenol)
Lignanós	-	Secundario (polifenol)
Isoflavonoides	-	Secundario (polifenol)
Flavononas	-	Secundario (polifenol)
Flavonoles	-	Secundario (polifenol)
Flavonoides	-	Secundario (polifenol)
Ácidos hidroxifenilpropanoicos	-	Secundario (polifenol)

Ácidos hidroxicinámicos	-	Secundario (polifenol)
Ácido galico	-	Secundario (ácido fenólico)
Fibra	Glucosa, xilosa, arabinosa, manosa	Primario (polisacárido)
Fitoesterol	-	Primario (lípido)
Resveratrol	-	Secundario (flavonoide)
Quercetina	-	Secundario (flavonoide)
Florotaninos	-	Secundario (polifenol)
Floroglucinol	-	Secundario (polifenol)
Fucano	Fucosa, manosa, galactosa, xilosa, ácido glucurónico	Primario (polisacárido sulfatado)
Fucoidano	Fucosa	
Fucosterol	-	Secundario (fitoesterol)
Fucoxantina	-	Secundario (xantofila)
Galactofucano	Fucosa, galactosa	Secundario (polisacárido sulfatado)
Glucano	Glucosa	Primario (polisacárido)
Lectina		Secundario (glucoproteína)
Glucuronomanano	Manosa, ácido glucurónico	Primario (polisacárido)
Glucuronomanano sulfatado	Manosa, ácido glucurónico	Primario (polisacárido)
Lactuco-fructosa	Galactosa, fructosa	Primario (polisacárido)
Laminarian	Glucosa	Primario (polisacárido)
Lignina	-	Secundario (fenol)
Liquiritigenina	-	Secundario (flavonoide)
Loliolide	-	Secundario (meroterpenoide)
Metano	-	Primario (Hidrocarburo)
Metanol	-	Secundario (alcohol)
Noroisoprenoide	-	Secundario (terpenoide)
Oxifitosterol	-	Secundario (fitoesterol)
Parabeno	-	Secundario (fenol)
Pectina	Ácido galacturónico	Primario (polisacárido)

Poligalactofucano	Fucosa, ácido galacturónico	Primario (polisacárido sulfatado)
Polisacáridos	Fucosa, ramnosa, arabinosa, glucoseamanoza, galactosa, xilosa, ácido glucurónico, ácido manurónico, manosa, ácido gulurónico, ácido galacturónico	Primario (polisacárido)
Polisacáridos carboximetilados	fucosa, galactosa, xilosa, manosa, glucosa	
Polisacáridos hidroxamados	fucosa, galactosa, xilosa, manosa, glucosa	
Polisacáridos sulfatados	Fucosa, xilosa, glucosa, galactosa, manosa, ramnosa, arabinosa, ribosa, ácido glucurónico, ácido manurónico	
Saponinas	-	Secundario (esteroide)
Sargacromenol	-	Secundario (meroterpenoide)
Saringosterol	-	Secundario (fitoesterol)
Talo completo seco	-	-
Talo completo fresco	-	-
Talo completo fermentado	-	-
Residuo extracción alginato	Fucosa	Primario (polisacáridos)

Cuadro 2. Tipos de extractos y sus polaridades presentes en los estudios analizados

Tipo de exacto	Polaridad
-----------------------	------------------

Extracto ácido clorhídrico	Polar
Extracto ácido lactuco-fructosa	Polar
Extracto acido-básico	Polar
Extracto acuoso	Polar
Extracto agua- isopropanol	Polar
Extracto alcalino	Polar
Extracto enzimático	Polar
Extracto etanol-agua	Polar
Extracto etanólico	Polar
Extracto hidroalcohólico	Polar
Extracto hidróxido de potasio	Polar
Extracto fermentado	Polar
Extracto acetato de etilo	No Polar
Extracto clorofórmico	No Polar
Extracto diclorometano	No Polar
Extracto de hidrolizados hidrotermales	Polar
Extracto éter dietílico	No Polar
Extracto hexánico	No Polar
Extracto lipídico	No Polar
Extracto lipofílico	No Polar

Extracto metanol diclorometano No Polar

Extracto petróleo éter No Polar

Extracto fluido supercrítico No Polar

Extracto comercial NA

Extracto pulverización a baja temperatura NA

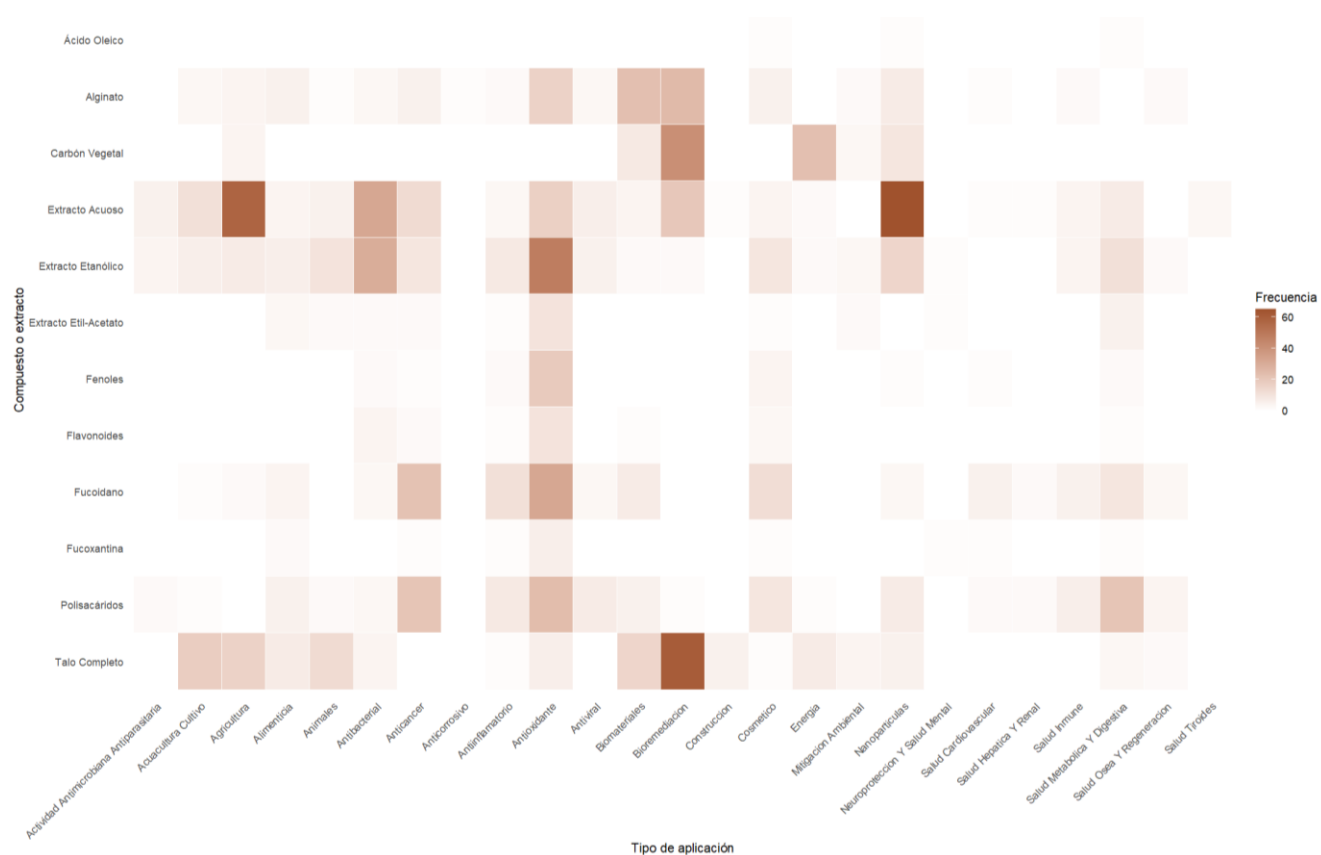


Fig. 8. Mapa de calor de la relación entre los compuestos con mayor ocurrencia y tipos de aplicaciones de *Sargassum*

Sujetos de estudio: En total se reportaron 80 especies del género *Sargassum* (Cuadro III). La especie más utilizada fue *Sargassum fusiforme*, presente en 73 ocasiones (Fig. 9), la cual es altamente utilizada para aplicaciones relacionadas con el ámbito médico (Fig. 10). Con respecto a las investigaciones que mencionaban el género, pero no la especie, se agruparon todas dentro de la categoría *Sargassum sp* (190 artículos). En cuanto a las especies pelágicas, se utilizaron las dos descritas inicialmente, ya que en los primeros años que cubre la revisión no se habían descrito las 3 especies que se encuentran actualmente. Por último, se pueden observar las especies más utilizadas de acuerdo con cada cuenca oceánica (Fig. 11).

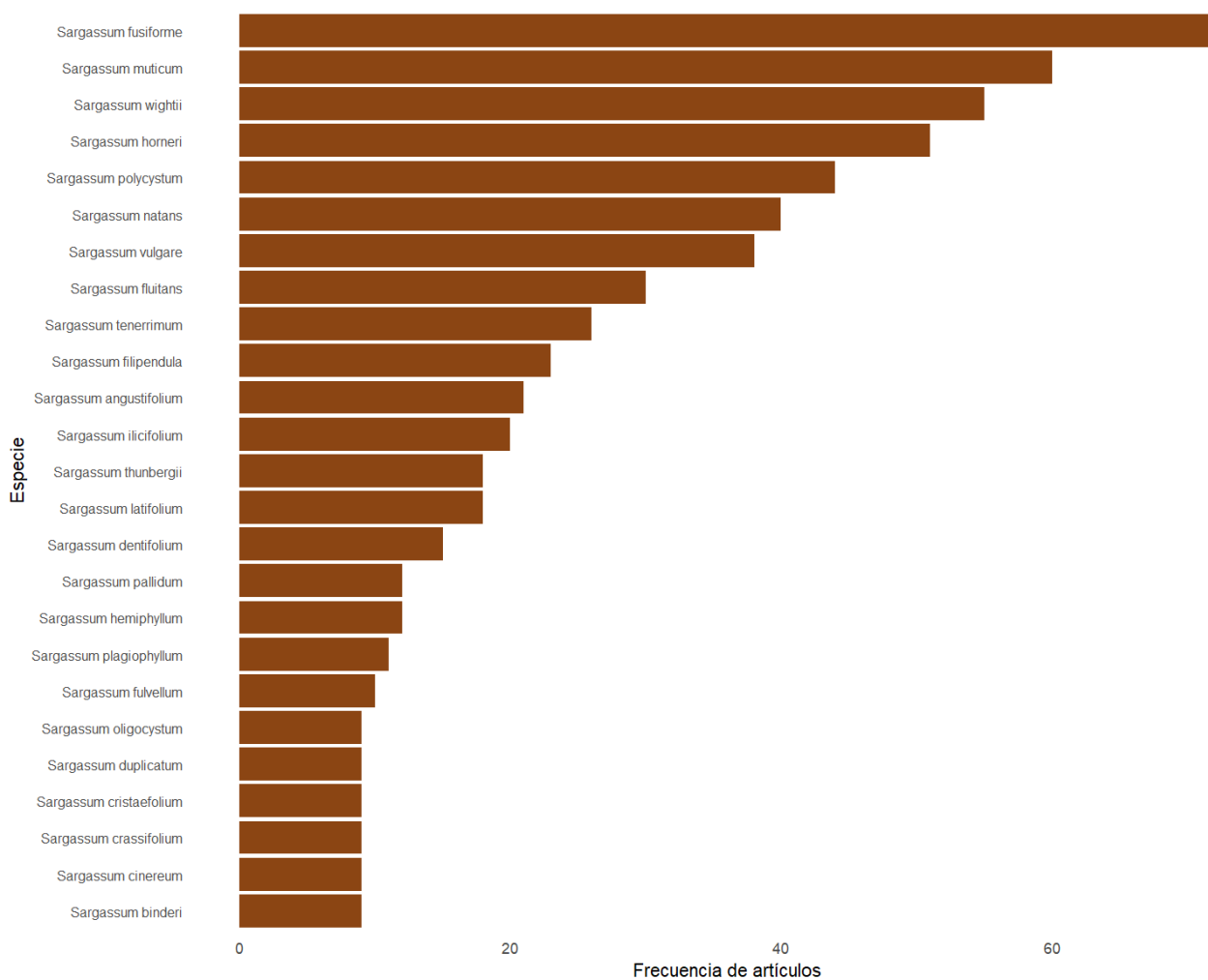


Fig. 9. Especies más utilizadas en las investigaciones sobre aplicaciones de *Sargassum*

Cuadro 3. Taxonomía a nivel de especie de las algas presentes en los 841 artículos aceptados y su ocurrencia. Resaltados se encuentran los taxones más frecuentes. Algunos estudios

trabajan con más de una especie de alga, por lo que la sumatoria de la cantidad puede superar 841

Especie	Cantidad
<i>Sargassum acinarium</i>	1
<i>Sargassum angustifolium</i>	22
<i>Sargassum aquifolium</i>	7
<i>Sargassum autumnale</i>	3
<i>Sargassum baccularia</i>	1
<i>Sargassum binderi</i>	9
<i>Sargassum boveanum</i>	9
<i>Sargassum buxifolium</i>	1
<i>Sargassum carpophyllum</i>	4
<i>Sargassum cervicorne</i>	1
<i>Sargassum cinctum</i>	2
<i>Sargassum cinereum</i>	10
<i>Sargassum confusum</i>	1
<i>Sargassum coreanum</i>	6
<i>Sargassum coriifolium</i>	2
<i>Sargassum crassifolium</i>	9
<i>Sargassum cristaeifolium</i>	9
<i>Sargassum cymosum</i>	4
<i>Sargassum denticulatum</i>	2
<i>Sargassum dentifolium</i>	15
<i>Sargassum desfontainesii</i>	1
<i>Sargassum duplicatum</i>	9
<i>Sargassum elegans</i>	2
<i>Sargassum euryphyllum</i>	1
<i>Sargassum feldmannii</i>	2
<i>Sargassum filipéndula</i>	23
<i>Sargassum fluitans</i>	30

<i>Sargassum fulvellum</i>	10
<i>Sargassum furcatum</i>	1
<i>Sargassum fusiforme</i>	73
<i>Sargassum glaucescens</i>	7
<i>Sargassum hemiphyllum</i>	12
<i>Sargassum henslowianum</i>	6
<i>Sargassum horneri</i>	51
<i>Sargassum hornschuchii</i>	1
<i>Sargassum horridum</i>	5
<i>Sargassum hystrix</i>	3
<i>Sargassum ilicifolium</i>	20
<i>Sargassum incisifolium</i>	1
<i>Sargassum integerrimum</i>	2
<i>Sargassum kjellmanianum</i>	3
<i>Sargassum lapazeanum</i>	2
<i>Sargassum latifolium</i>	18
<i>Sargassum liebmannii</i>	1
<i>Sargassum linearifolium</i>	1
<i>Sargassum linifolium</i>	4
<i>Sargassum longifolium</i>	4
<i>Sargassum macrocarpum</i>	2
<i>Sargassum mcclurei</i>	2
<i>Sargassum micracanthum</i>	2
<i>Sargassum microystum</i>	1
<i>Sargassum muticum</i>	61
<i>Sargassum myriocystum</i>	7
<i>Sargassum naozhouense</i>	1
<i>Sargassum natans</i>	40
<i>Sargassum oligocystum</i>	10
<i>Sargassum orotavicum</i>	1
<i>Sargassum pallidum</i>	12

<i>Sargassum paradoxum</i>	1
<i>Sargassum pectinifera</i>	1
<i>Sargassum plagiophyllum</i>	11
<i>Sargassum platycarpum</i>	1
<i>Sargassum polyceratium</i>	3
<i>Sargassum polycystum</i>	41
<i>Sargassum prismaticum</i>	2
<i>Sargassum serratifolium</i>	4
<i>Sargassum siliquastrum</i>	8
<i>Sargassum siliquosum</i>	4
<i>Sargassum sp</i>	129
<i>Sargassum squarrosus</i>	1
<i>Sargassum stenophyllum</i>	2
<i>Sargassum subrepandum</i>	2
<i>Sargassum swartzii</i>	7
<i>Sargassum tenerrimum</i>	27
<i>Sargassum thunbergii</i>	18
<i>Sargassum vachellianum</i>	1
<i>Sargassum vestitum</i>	2
<i>Sargassum vulgare</i>	38
<i>Sargassum wightii</i>	55
<i>Sargassum yezoense</i>	1
<i>Sargassum Zhangii</i>	1

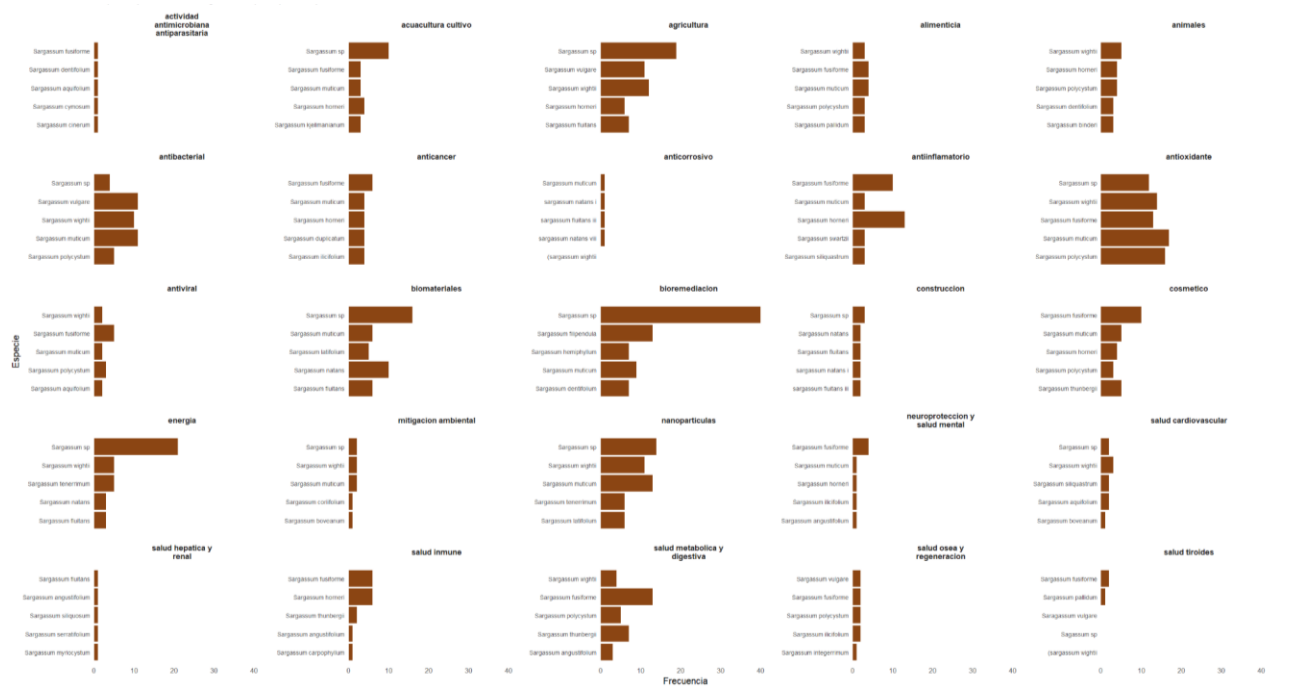


Fig. 10. Distribución de las 5 especies de *Sargassum* más frecuentes según tipo de aplicación

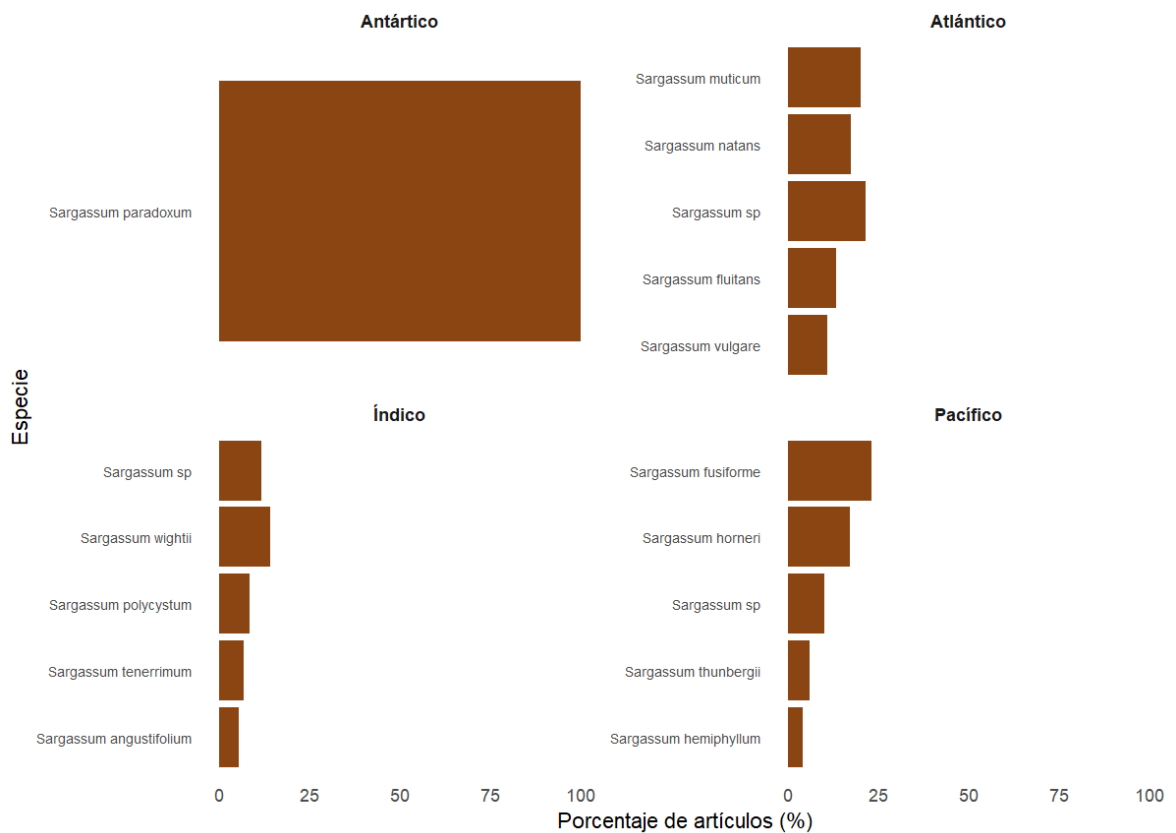


Fig. 11. Top 5 especies de *Sargassum* por océano, según su porcentaje de uso en diversas aplicaciones

DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática muestra la existencia de una gran cantidad de estudios que evalúan las posibles aplicaciones de las macroalgas del género *Sargassum*. El interés que han despertado estos organismos en las últimas décadas se debe al número y a la diversidad de compuestos bioactivos que poseen (Cardoso et al., 2015). El aumento de publicaciones relacionadas con este tema en la última década (Fig.2) está asociado en gran parte al desarrollo de nuevas tecnologías que permiten el descubrimiento y aislamiento de una mayor cantidad de compuestos (Salehi et al., 2019).

En esta revisión se encontró que la mayoría de los estudios eran originarios de Asia, lo cual coincide con que es el continente donde se da la mayor producción comercial de macroalgas, se encuentran las especies del Pacífico y se da el uso medicinal ancestral (Nayar & Bott, 2014; Hwang et al., 2019; Liu et al., 2020); por lo tanto, es donde se tiene mayor interés por este tipo de productos y por cómo se pueden explotar en diversos campos. Adicionalmente, uno de los países que participa en varias de estas investigaciones es China que, junto con los países de la Unión Europea, es uno de los que cuenta con mayor disponibilidad de recursos económicos para invertir en este tipo de investigaciones científicas. En cuanto a las publicaciones del continente americano, se puede observar que la mayoría de los estudios se realizaron en países ubicados en el Caribe, lo cual se puede relacionar de manera directa con las arribaciones de sargazo flotante que han estado ocurriendo en las últimas dos décadas, ya que esto ha despertado el interés de tales países en aprovechar este recurso, cuya biomasa es mayor cada año (Lopez-Contreras et al., 2021; Amador-Castro et al., 2021).

Con respecto al tipo de aplicaciones, la mayoría se ubican en el ámbito de la industria médico-farmacéutica. Entre estas aplicaciones derivadas de compuestos presentes en *Sargassum* se encuentra una amplia gama de propiedades terapéuticas y preventivas; por ejemplo, actividades relacionadas con la salud inmune (Park et al., 2024; Yang et al., 2024) y la salud cardiovascular (Samir et al., 2023), con propiedades antihipertensivas (Shin et al.,

2013; Surabhi et al., 2021) y anticoagulantes (Shobharani et al., 2014; Montesinos et al., 2022), lo que sugiere el potencial de este género para el tratamiento de enfermedades crónicas.

Asimismo, se ha reportado su uso en la salud metabólica y digestiva con respecto a la mejora de la motilidad intestinal y la digestión (Koh et al., 2024; Tipbunjong et al., 2024), la prevención de la obesidad (Kim et al., 2014; Oliyaei et al., 2023; Lee et al., 2024) y las propiedades antidiabéticas (Akbarzadeh et al., 2018; Gheda et al., 2023; Roy et al., 2024). En la salud hepática y renal se reporta un efecto protector tanto para el hígado (Vasquez et al., 2016) como para los riñones (Pourkhalili et al., 2021), lo cual demuestra su relevancia en el manejo de trastornos metabólicos. Con respecto a la neuroprotección y la salud mental, algunos estudios reportaron efectos antialzheimer (Bogie et al., 2019; Vanbrabant, et al., 2021) y la protección del daño neuronal (Wei et al., 2021).

Por otro lado, con respecto a la salud ósea y regenerativa se encontraron contribuciones a la disminución de la osteoporosis (Kim et al., 2018), la regeneración ósea y dental (Yashaswini et al., 2022; Weitkamp et al., 2024) y el desarrollo de andamios óseos (Devi et al., 2022). También se encontraron aplicaciones médicas cutáneas relacionadas con la curación de heridas (Moni et al., 2018; Premarathna et al., 2021) y propiedades antialérgicas (Han et al., 2020), lo que pone en evidencia la versatilidad de aplicaciones médicas en las que el sargazo se puede utilizar. Por último, también se encontraron actividades antimicrobianas y antiparasitarias como propiedades anti malaria y anti leishmaniasis (Veeragoni et al., 2023; Armeli-Minicante et al., 2016).

En adición a todas las propiedades medicinales mencionadas anteriormente, en este trabajo también se incluyeron las categorías de las actividades anticancerígenas, desde leucemia hasta cáncer de mama y colorectal, (Al-Aadily et al., 2022; Salunke et al., 2022; Obeidi et al., 2023), antibacteriales (Tanniou et al., 2014; Pirian et al., 2018; Magesh et al., 2020), antioxidantes (Shao et al., 2013; Tian et al., 2020; Sobuj et al., 2024), antiinflamatorias (Wen et al., 2016; Je et al., 2024) y antivirales contra una gran diversidad de virus, desde el citomegalovirus (Wang et al., 2021) y varios virus respiratorios como el respiratorio sincitial

(Zhang et al., 2024), hasta el virus de la Inmunodeficiencia Humana (Thuy et al., 2015), pues se mencionan en un mayor volumen en las publicaciones.

Es importante resaltar que en la mayoría de los trabajos se estudian las propiedades bioactivas de las algas, pero no se desarrolla cómo estas se pueden implementar en la industria farmacéutica como tal. Esto se debe a que el desarrollo de medicamentos es un proceso que toma un tiempo prolongado, ya que es necesario pasar por diversas etapas de aprobación y se requieren altas inversiones de dinero (Stengel & Connan, 2015). Sin embargo, estas etapas iniciales que elucidan las posibles aplicaciones de las macroalgas son fundamentales para llegar finalmente a la creación de productos en los que se puedan utilizar.

Algo similar ocurre con las aplicaciones en la industria cosmética, donde los compuestos derivados de *Sargassum* han mostrado un gran potencial: reportan actividades antienvjecimiento (Hu et al., 2022; Yao et al., 2022), que también se pueden asociar a su capacidad para funcionar como filtro ultravioleta natural (Han et al., 2016; Fernando et al., 2021), así como para inhibir la hialuronidasa, que es una enzima implicada en la degradación del ácido hialurónico de la piel (Arunkumar et al., 2021; Kurinjery & Kulanthaiyesu, 2022). Además, otros compuestos presentan propiedades antimelanogénicas (Prasedya et al., 2022; Chen et al., 2024), pues ayudan a regular la pigmentación cutánea. También se encontraron investigaciones donde se describía la acción de *Sargassum* sobre la barrera cutánea relacionada con el colágeno, que favorece la firmeza de la piel (Kang et al., 2024). Otros estudios destacaron ciertos beneficios en el crecimiento capilar (Huang et al., 2022; Rajan et al., 2023), la actividad antiacné (Kok et al., 2016) y la protección de la piel contra contaminantes ambientales, como por ejemplo el polvo fino (Fernando et al., 2020; Dias et al., 2021). Todas estas aplicaciones reafirman que este género es una fuente prometedora de compuestos con propiedades bioactivas para desarrollar productos en la industria cosmética.

Por otra parte, mediante las nanopartículas que se crean también se pueden utilizar en la industria relacionada con la salud, ya que se utilizan las algas tanto para su formación como para aprovechar sus propiedades bioactivas, tales como las anticancerígenas (Govindaraju et al., 2015), las antidiabéticas (Dhas et al., 2016), antioesidad (Park ET AL., 2022), hepatoprotectores (Vasquez et al., 2016) y las antioxidantes (Barwant et al., 2024),

entre otras. Adicionalmente, estas también son utilizadas en otras industrias como la agrícola, donde su principal uso es como bioestimulantes (Rodríguez-Quesada et al., 2024), mientras que en casos particulares se utilizan en la ganadería lechera, principalmente para la detección de melamina en la leche (Zhou et al., 2020). Otro uso que se les da es la biorremediación, ya que son capaces de remover de medios acuosos desde metales (Almutairi et al., 2021) y tintes (Balaraman et al., 2020) hasta medicamentos como el ibuprofeno (López-Miranda et al., 2022). Finalmente, se encontraron investigaciones en las que se utilizaban como insecticidas o larvicidas (Madhiyazhagan et al., 2015; Lean et al., 2023) y como catalizadoras de reacciones energéticas (Rosas-Medellín et al., 2021).

Es importante mencionar que en la mayoría de los casos las nanopartículas utilizan el sargazo por sus propiedades bioactivas, pero se encuentran conjugadas con distintos tipos de materiales, principalmente metales como el oro (Costa et al., 2020), la plata (El-Sayed., 2024), el selenio (Chen et al., 2024), el magnesio (Pugazhendhi et al., 2019) o el zinc (Karkhane., 2020). Sin embargo, también se utilizan otros compuestos metaloides como el óxido de hierro (Fe_3O_4) (Silva et al., 2013), no metaloides como el sílice (Tsou et la., 2023), la celulosa (Trejo-Caballero et al., 2024) o el carbón (Kim., 2022), que provienen de las algas. En algunos casos el *Sargassum* no se emplea por sus propiedades bioactivas, sino como material estructural en la formación de las nanopartículas, ya que al utilizar el material algal se realiza una síntesis verde más amigable con el ambiente (Pekkoh et al., 2023; Xin et al., 2023).

Con respecto a las aplicaciones para la industria agropecuaria, se encontraron productos para el control de plagas (pesticidas, larvicidas, fungicidas) (Mostafa et al., 2022), fertilizantes (Coelho et al., 2017; Thompson et al., 2021) y bioestimulantes (Carvalho et al., 2019; Ali et al., 2022), siempre en la búsqueda de alternativas verdes a los productos ya existentes, que se componen principalmente de químicos con repercusiones en la cadena trófica (Díaz & Aguilar, 2018), así como la distribución dirigida de compuestos químicos (Zhang et al., 2020).

Algo similar ocurre con las aplicaciones en la acuicultura, cuyo principal objetivo era encontrar medicamentos para mantener una buena salud en los peces (Sun et al., 2024, Hu et

al., 2024, Shi et al., 2021, Belleza et al., 2019), camarones (Schleder et al., 2020; Rezende et al., 2022) y otros individuos cultivados como los pepinos (Pan et al., 2023) y erizos de mar (Hu et al., 2020), tratando de eliminar plagas y enfermedades (Thanigaivel et al., 2019; Félix et al., 2020). Asimismo, estas algas también se utilizan como suplemento alimenticio para bajar la toxicidad de ciertos metales pesados como el cromo (Shi et al., 2024) y en algunos casos sus aplicaciones se relacionan con otras especies de algas, por ejemplo, se utiliza extracto de *Sargassum* para mejorar el estrés térmico de ciertos cultivos de macroalgas (Xing et al., 2023), o como biofertilizante en cultivos de macroalgas (Tahluddin et al., 2022) y de microalgas (Natsir et al., 2017). Por último, algunos artículos reportan su uso como medio de cultivo (Park et al., 2021; Cabello-Galindo et al., 2024).

En cuanto a las aplicaciones de *Sargassum* relacionadas con animales, estas han mostrado enfoques tanto ambientales como productivos. Se ha reportado la reducción de la contaminación ganadera, especialmente de porquerizas (Madhavaraj et al., 2020); además, se han usado como suplemento alimenticio de rumiantes, con lo cual disminuyen las emisiones de metano (Choi et al., 2019; Park et al., 2022), lo que plantea una estrategia de ganadería sostenible. Asimismo, se encontraron investigaciones sobre las propiedades bioestimulantes del alga en la dieta de conejos (Saghir et al., 2023) y en avicultura se ha incorporado en la dieta de pollos de engorde, lo que ha mejorado su crecimiento (Subakir et al., 2021; Al-Khalaifah & Al-Nasser, 2024). También se ha empleado como aglutinante para la formación de pellets de alimento de estas aves (Dewi et al., 2018). Por último, se investigó su potencial como cebo para pesca (Dumilag et al., 2023) y su efectividad como larvicida (Bianco et al., 2013; Balaraman et al., 2020).

Los usos de *Sargassum* en la industria alimenticia abarcan desde funciones tecnológicas hasta algunos beneficios nutricionales. Como preservante, se ha empleado para mejorar la vida útil de los filetes congelados de varios tipos de pescado (Afrin et al., 2023; Khorami, et al., 2024) y, como conservante, en gel de surimi (Shitole et al., 2014) y cobertura protectora para tomates y papayas en almacenamiento (Ramani et al., 2020; Martínez-Molina et al., 2024). Igualmente, se ha utilizado para proteger de la oxidación aceites sensibles como el de hígado de tiburón (Chakraborty & Joseph, 2018) o de pescado (Vardizadeh et al., 2021) y para procesos de desodorización de compuestos volátiles (Khalafu et al., 2017), todo lo. En

cuanto a sus aplicaciones como ingrediente funcional, el sargazo se ha incorporado en bebidas fermentadas tipo kombucha (Tu et al., 2024), en bebidas y en barras antioxidantes (Nurcahyanti et al., 2021; Nurcahyanti et al., 2023) y como infusión para ayudar a prevenir trastornos metabólicos (Fauziyah et al., 2021; Bai et al., 2024). Además, se ha utilizado como sustituto parcial de harina en productos como galletas (Gan et al., 2023) y fideos (Egodavitharana et al., 2024), y para mejorar la calidad del “jerky” de pescado (Hanjabam, 2017). En el nivel tecnológico, con ellas se han desarrollado películas comestibles para empacar productos (Yuan et al., 2021) y se han utilizado como emulsificante (Fawasy et al., 2017), estabilizante de la mayonesa (Savaghebi, et al., 2021) y colorante natural (Tun Norbrillinda et al., 2016), lo cual evidencia su potencial en diversos ámbitos de la industria alimenticia.

Por otra parte, el sargazo ha demostrado un gran potencial en el desarrollo de biomateriales, con aplicaciones que van desde el diseño de empaques sostenibles hasta tecnologías médicas y ambientales. En el área de los bioplásticos se han desarrollado biopelículas plásticas para empacar alimentos (Wu et al., 2021; Bouzenad et al., 2024, Raju et al., 2024)), nanofibras para la fabricación de cubiertos y vajillas biodegradables (Li et al., 2023), y papeles y materiales de impresión a partir de fibras de alginato (Hamrun et al., 2022; Fauzan et al., 2024). En el ámbito médico, se han fabricado hidrogeles tanto para el tratamiento de heridas (Huang et al., 2022; Zhuang et al., 2024) como para la liberación controlada de fármacos (Gomaa et al., 2018), así como materiales de impresión para moldes dentales (Thalib et al., 2020). Entre sus aplicaciones ambientales destacan las membranas y espumas para la remoción de contaminantes (Ahmed et al., 2021; Elizalde-Mata et al., 2024) y biofiltros para la absorción de gases tóxicos (Escobar et al., 2024). En el ámbito de la innovación tecnológica, el sargazo se ha utilizado para crear nanoarcillas con propiedades ignífugas (Xu et al., 2024) y como componente para el almacenamiento de hidrógeno (Rosas et al., 2024), con lo cual se pone en evidencia el gran potencial de este género como fuente para el diseño y la producción de biomateriales funcionales.

Relacionadas con las aplicaciones de biomateriales se encuentran las que se utilizan para la industria de la construcción, donde el sargazo ha sido explorado como materia prima para crear materiales sostenibles. Así, por ejemplo, se ha empleado como sustituto parcial

del cemento Portland (Chahbi et al., 2024) y como modificador del asfalto para mejorar la resistencia al desgaste de las carreteras (Salazar-Cruz et al., 2021). Asimismo, se ha usado como material puzolánico, que reacciona con la cal y el agua, para mejorar las propiedades mecánicas de morteros y concretos (Bilba et al., 2023). En otros usos más convencionales, se agrega como aglutinante para la tierra cruda de construcción, con lo cual mejora la cohesión del material (Graich et al., 2024). También se ha empleado para la adición de minerales en fibras de cemento y en cerámicas estructurales (de Morales et al., 2024; Parente et al., 2024), a fin de mejorar su resistencia y durabilidad. Finalmente, se ha utilizado para el control costero mediante la elaboración de estructuras blandas para reducir la erosión en las playas (Innocenti et al., 2018).

En cuanto a las aplicaciones del género *Sargassum* en el ámbito energético y la generación de combustibles, se incluyen tanto la producción directa de bioenergía como su uso en tecnologías avanzadas de almacenamiento y conversión energética. Se encontraron investigaciones donde se utilizó como materia prima para la generación de biocombustibles como biogás (Thompson et al., 2020; Yuhendra et al., 2021), metano (Soto et al., 2015; Chikani-Cabrera et al., 2022), hidrógeno (Snehya et al., 2022; Qi et al., 2023), etanol (Widyaningrum, 2016; Sunwoo et al., 2023) y biocombustibles sólidos (López-Sosa et al., 2020), con lo cual se constituye en una posible alternativa ecológica para los combustibles fósiles. Asimismo, diversos estudios han utilizado el carbono derivado del sargazo para construir electrodos en supercondensadores (Jia et al., 2020; Li et al., 2022), así como ánodos en celdas de combustible microbiano (Wu et al., 2018) y electrodos para la purificación del agua (Huang et al., 2023). Por otra parte, se ha usado como colorante sensibilizador en dispositivos que pueden captar la luz solar y generar electricidad, (Anand & Suresh, 2015), y, en forma de nanopartículas cubiertas por plata, en sistemas termoeléctricos debido a sus propiedades de conductividad térmica (Bakhshan et al., 2019). Por último, se ha empleado como catalizador ecológico en diversas reacciones, como la reacción de reducción del oxígeno o la electrólisis del agua (Attokkaran et al., 2024; Chen et al., 2024).

El sargazo ha demostrado una alta eficiencia como bioabsorbente para la remoción de contaminantes inorgánicos en el agua. Un gran número de estudios analiza su capacidad para eliminar metales pesados como plomo (Asencios et al., 2022), cadmio (Nishikawa et al.,

2018), cromo (Almutairi et al., 2021), níquel (Suzaki et al., 2023) y zinc (Cardoso et al., 2020), y metales tóxicos como mercurio (Liu et al., 2019), arsénico (Tabaraki & Heidarizadi, 2018) y antimonio (Ungureanu et al., 2017). Además, se ha usado para recuperar iones de metales de alto valor como la plata y el cobre (Júnior et al., 2021), con lo cual se usa no solo como biorremediador, sino también como biorrecuperador. En el nivel ambiental, se emplea para remover metales radioactivos como el uranio y el torio (Albayari et al., 2024) y para eliminar elementos raros (Gad, 2016) y compuestos peligrosos como la hidrazina (Tabaraki & Nateghi, 2016). Asimismo, se ha usado para reducir las concentraciones de nitrógeno y fósforo en aguas contaminadas, con lo cual se reducen los efectos de la eutrofización (Yu et al., 2014; Abdulwahid et al., 2023).

Con respecto a la bioadsorción de contaminantes orgánicos, se ha encontrado que la biomasa de *Sargassum* puede adsorber y degradar una amplia gama de colorantes sintéticos, como el verde de malaquita (Devi et al., 2022), el azul de metileno (da Gama et al., 2024), el rojo congo (Ma et al., 2020), el cristal violeta (Abd El-Hamid et al., 2022), el amarillo de eosina (Bai et al., 2021) y el tinte negro a base de azufre (Vijayaraghavan & Shanthakumar, 2015), derivados principalmente de las industrias textiles, y para ello se utilizan en su mayoría propiedades coagulantes del alga. A la vez, se ha reportado su eficiencia en la remoción de fármacos tipo antibióticos como la tetraciclina (Song et al., 2019; Francoeur et al., 2023) y de otros medicamentos como acetaminofén (Bae et al., 2024) e ibuprofeno (Martínez-Meraz et al., 2023), que forman parte de los contaminantes emergentes que generan una creciente preocupación ambiental.

También, se han encontrado investigaciones que reportan la adsorción de fenoles (Navarro et al., 2016), hidrocarburos aromáticos (Hung et al., 2022), cafeína (Francoeur et al., 2021), pesticidas (Elizalde-Mata et al., 2024; Stephan et al., 2024) y herbicidas (Hasan et al., 2024), lo que posiciona al género como un biomaterial de gran versatilidad para el tratamiento de aguas contaminadas. Adicionalmente, se reporta su actividad como agente quelante (Lodeiro & Sillanpää, 2013; Vijayaraghavan & Shanthakumar, 2015), útil también en el ámbito de la remoción de compuestos. Por último, en el ámbito de la mitigación ambiental, además de la remoción de contaminantes ya mencionada, se identificaron otras aplicaciones relevantes, como la reducción en el uso de azufre para la fabricación de fuegos

artificiales (Gnanavel & Vignesh, 2023) y la captura de dióxido de carbono (Zeng et al., 2018).

En cuanto a las formas de utilización de las algas para estas diversas aplicaciones, los metabolitos primarios se reportan como los más usados, pues son los componentes principales de las macroalgas (Khairy & El-Shafay, 2013). Se dividen en 3 grandes grupos, que son: carbohidratos, proteínas y lípidos; los primeros son los más abundantes y los últimos los menos abundantes (Salehi et al., 2019), siendo estos más fáciles de detectar y extraer de los talos en comparación con los metabolitos secundarios. Según lo encontrado en la revisión, estos son la segunda forma de empleo de las macroalgas para sus aplicaciones, ya que su identificación, extracción y caracterización son más complejas (Lafarga et al., 2020) y su composición es muy variable, pues depende de las condiciones (climáticas, estacionales, reproductivas y otras) en las que se encuentre cada organismo (Marinho-Soriano et al., 2006). Precisamente por las dificultades para extraer e identificar los metabolitos secundarios también se implementa el uso de extractos con diferentes disolventes afines a diversos compuestos presentes en las macroalgas (Barrera-Necha & Bautista-Baños, 2008). Por último, la mayoría de las aplicaciones para las que se emplearon talos completos se relacionan con la remoción o bioadsorción de diferentes materiales y se usó el material seco y molido, colocado directamente en el agua para regar la planta (Dobaradaran et al., 2017; Buhani et al., 2024).

En relación con los tipos de compuestos que se lograron encontrar en la revisión, entre los metabolitos primarios se puede observar que la mayoría son polisacáridos, es decir, carbohidratos complejos. Esto concuerda con la composición primaria de las macroalgas, ya que su principal componente son los carbohidratos, que constituyen entre un 15% y un 40% del peso seco de las algas (Neto et al., 2018; Hessami et al., 2018). Los carbohidratos más estudiados y para los que se encontró una mayor cantidad de aplicaciones son los polisacáridos sulfatados, como el fucoídano y la laminarina, y la mayoría de sus aplicaciones se relacionan con la salud (Hu et al., 2017; Ma et al., 2022; Antonisamy & Rajendran, 2024). También se encontraron otros polisacáridos, pero no sulfatados: el alginato y la celulosa, posiblemente con menos incidencia porque son productos que vienen siendo estudiados

desde hace más tiempo y ya se conocen diversas aplicaciones para ellos (Venkatesan et al., 2015).

Por su parte, la diversidad de metabolitos secundarios tiene una menor ocurrencia, esto principalmente si se considera el gran número de compuestos que pueden existir. Dentro de ellos, los grupos más importantes son los compuestos fenólicos, que poseen mayor variación estructural y se encuentran en mayor contenido en las macroalgas respecto de otros metabolitos secundarios (Cotas et al., 2020). Los fenoles se componen principalmente de florotaninos, flavonoides y taninos, y la mayoría de sus aplicaciones se encuentran en el ámbito de la salud, ya que tienen propiedades antioxidantes, anticancerígenas y antivirales, entre otras (Luna-Pérez, et al., 2023 Vinodkumar & Packirisamy., 2023; Bousoo, et al., 2024). Asimismo, en los artículos revisados también se mencionan los terpenos entre los metabolitos secundarios y se clasifican de acuerdo con su unidad básica que es el isopreno. Se dividen en monoterpenos, sesquiterpenos y diterpenos, entre otros (Janarthanan & Senthil-Kumar, 2018). Estos, al igual que los fenoles, poseen una mayor cantidad de aplicaciones en la industria médico farmacéutica, pues poseen propiedades terapéuticas (anticancerígenas o antibacteriales) (Balboa, et al., 2015; Jayawardena et al., 2021; Cao et al., 2024). Por último, se encontraron otros compuestos como pigmentos accesorios (fucoxantina y carotenoides), empleados principalmente en la industria de la salud humana (Balasubramaniam et al., 2020; Nurcahyanti, et al., 2021; Kurinjery & Kulanthaiyesu, 2022; Oliyaei et al., 2023).

Para los artículos que emplearon extractos en vez de un compuesto, se encontró que el más usado fue el acuoso, principalmente porque este es el tipo de extracto que se utiliza para la biosíntesis de nanopartículas a partir de macroalgas (Bakhshan et al., 2019; Rosas-Medellín et al., 2021; Figueroa-Ramírez et al., 2024) y esta es una de las aplicaciones con un porcentaje elevado de ocurrencia en la revisión. Seguidamente se encuentran los extractos etanólicos, empleados por sus propiedades antioxidantes, antibacteriales, anticancerígenas y antiinflamatorias (Manzoor et al., 2014; Nazarudin et al., 2020; Rajan et al., 2023; S'thandiwe et al., 2024). Luego se encuentran los extractos con etil-acetato, que principalmente fueron utilizados por sus propiedades antioxidantes y anticancerígenas (Pirian et al., 2017; Pirian et al., 2018; Samuvel et al., 2024).

En relación con la taxonomía de las especies más utilizadas para las diversas aplicaciones, esta refleja tanto su valor biotecnológico como la disponibilidad geográfica de cada una de ellas. *Sargassum fusiforme* fue la especie más reportada en la literatura y tiene una amplia presencia en Asia, principalmente en China, Corea del Sur y Japón (Liu et al., 2020), de ahí su uso en la medicina tradicional (Chathuranga et al., 2021). Además, es un alga comestible en esta región asiática (Wei et al., 2020), lo que provoca un alto interés en estudiar sus propiedades biológicas. Esta especie ha sido ampliamente usada por sus propiedades en el campo de la salud, entre ellas las antioxidantes (Yao et al., 2023), las anticancerígenas (Hao-Miao et al., 2021) y las antidiabéticas (Li et al., 2021), entre otras. Otra de las especies de origen asiático (Han et al., 2016) que también fue ampliamente estudiada en las investigaciones analizadas fue *Sargassum muticum*, actualmente considerada una especie invasora para las aguas del continente europeo (Le Lann et al., 2012), lo que ha despertado un gran interés por estudiarla y encontrar posibles usos de las grandes cantidades de biomasa que se acumulan (Affan et al., 2023); cabe mencionar que se han encontrado principalmente propiedades antioxidantes (Jesus et al., 2023) y antibacterianas (Susano et al., 2022). Por su parte, *Sargassum wightii* es una especie distribuida en aguas poco profundas y en arrecifes de coral del sur de India, así como en otras partes del continente asiático (Magesh et al., 2020); sin embargo, todas las investigaciones incluidas en esta revisión, con respecto a esta especie, se ubicaron en India, y se destacan las aplicaciones en el ámbito médico (Chakraborty & Maneesh, 2020; Deepak et al., 2024) y agrícola (Muthezhilan et al., 2014; Lalruatfeli et al., 2024).

Otra especie ampliamente utilizada fue *Sargassum horneri*, un alga comestible en el noreste de Asia (Herath et al., 2021) y reconocida por su contenido en compuestos antioxidantes (Kim et al., 2020) y antiinflamatorios (Han et al., 2021). Por su parte, *Sargassum polycystum* posee una distribución extensa en el Indo-Pacífico (Abdulwahid et al., 2023) y ha causado afloramientos en países como Egipto (Abdulwahid et al., 2023) y Tuvalu (N'Yeurt & Iese, 2015), lo cual genera un impacto ambiental, pero también oportunidades de valorización de la biomasa presente. Adicionalmente, se trata de una especie comestible y usada en la medicina tradicional china (Matanjun et al., 2009; Wu et al., 2022), lo que también se asocia con sus propiedades en el campo de la salud encontradas en la revisión (Zaharudin et al., 2018; Arguelles., 2022).

En el océano Atlántico, específicamente en el mar de los sargazos (Wang, et al., 2019), se encuentran las especies flotantes (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*), las cuales se han expandido y han llegado por medio de arribadas masivas a las costas de los países ubicados en el mar Caribe y África (Van Tussenbroek et al., 2017; Chávez et al., 2020), lo cual genera problemas socio-económico-ambientales y ha despertado la urgencia por encontrar usos para la biomasa varada en las costas (Alzate-Gaviria et al., 2020; Bilba et al., 2023). Es importante mencionar que, si bien en la actualidad se considera que existen 3 especies flotantes: *Sargassum fluitans* III, *Sargassum natans* VIII y *Sargassum natans* I, no se incluyeron estas variantes, ya que muchos artículos no toman en cuenta esta división. Por último, un grupo significativo de registros fue clasificado como *Sargassum* sp., pues aunque muchas de estas muestras eran descritas como especies flotantes, provienen del Caribe y corresponden posiblemente a *S. natans* o *S. fluitans*, pero no pudieron ser asignadas con certeza taxonómica.

Esta revisión evidencia el amplio espectro de aplicaciones que brinda el género *Sargassum*, que abarca desde usos médicos, cosméticos y alimenticios hasta la creación de biomateriales, aplicaciones en construcción, energía, remediación ambiental y procesos biotecnológicos innovadores. Las especies más utilizadas corresponden en su mayoría a regiones del continente asiático, donde su disponibilidad natural y su uso tradicional han favorecido su estudio y aprovechamiento. Se destaca entonces el papel del sargazo como una materia prima versátil, gracias a sus propiedades bioactivas y a su valor estructural. Sin embargo, es de suma importancia considerar los posibles riesgos asociados a la bioacumulación de metales pesados y otros contaminantes, principalmente en aplicaciones para el consumo humano o animal. Por lo tanto, se recomienda que para futuras investigaciones se incluyan estudios que evalúen la inocuidad del material utilizado, así como metodologías para asegurar la toxicidad y trazabilidad en sus diferentes usos, a fin de lograr una valorización sostenible y segura del sargazo como recurso.

A pesar del amplio rango de compuestos y aplicaciones identificadas, la industria global basada en *Sargassum* sigue sin consolidarse debido a múltiples limitaciones. Entre las más importantes se encuentran la alta variabilidad estacional y geográfica de las arribaciones, que dificulta el suministro constante y la estandarización de la biomasa (López-Miranda et

al., 2021; Robledo et al., 2021; Thompson et al., 2020), así como la marcada variación en su composición química según la localización, la temporada y la etapa de desarrollo en la que se encuentra, lo que complica su aprovechamiento industrial y la formulación de productos consistentes (Martínez-Martínez et al., 2025; López-Miranda et al., 2021). A esto se suman barreras técnicas, como la necesidad de tecnologías novedosas para todas las etapas del cultivo, la falta de infraestructura para su procesamiento a gran escala (Cunha do Santos et al., 2024; Speede et al., 2024; López-Miranda et al., 2021; Robledo et al., 2021; Buschmann & Camus, 2019) y los altos costos de recolección, transporte y tratamiento de arribazones masivas (Cunha do Santos et al., 2024; Milledge et al., 2020). La calidad de la biomasa también plantea retos: su alto contenido en fibra no digerible, compuestos fenólicos y su capacidad de absorber metales pesados como el arsénico limita su uso alimentario, agrícola o bioenergético si no se aplican procesos de purificación adecuados (Milledge et al., 2020; Thompson et al., 2020). Aunque existen experiencias exitosas de cultivo de *Sargassum fusiforme* en Asia (utilizado principalmente para el consumo alimenticios), posicionado a la especie como una de las 7 más cultivadas en el mundo (FAO, 2016), la replicación de estos sistemas requiere condiciones ambientales óptimas y un conocimiento detallado del ciclo de vida de cada especie. (Buschmann et al., 2017).

El contexto histórico de la acuicultura de macroalgas pone en evidencia con el cultivo de géneros como *Pyropia*, *Saccharina* y *Kappaphycus* la necesidad de siglos de uso tradicional, décadas de desarrollo tecnológico y la introducción de programas de selección de cepas con rasgos productivos o resistencia a enfermedades (Valero et al. 2017; Hwang et al. 2019). El desarrollo de una “ficonomía” sólida para *Sargassum* exige investigación aplicada sobre su cultivo, optimización de luz y nutrientes, control de patógenos y herbívoros, y biorefinerías capaces de aprovechar integralmente la biomasa para reducir residuos y maximizar el valor añadido (Hurtado et al., 2019; Buschmann et al. 2017; Neori et al. 2007). Así como la creación de un mercado, principalmente para el aprovechamiento de estas algas en el mundo occidental, ya que la cultura del consumo de algas sigue siendo limitada salvo por el crecimiento de la industria del suhi (Hsin-I Feng, 2012) y la demanda de polisacáridos como el agar, el alginato y el carragenano (Cardoso et al., 2014).

Los resultados de esta revisión evidencian el notable potencial de *Sargassum* como fuente de compuestos bioactivos con aplicaciones en salud, cosmética, agricultura, biotecnología, mitigación ambiental entre otros. Sin embargo, su aprovechamiento a escala industrial enfrenta retos significativos, como la variabilidad estacional y geográfica de la biomasa, la falta de tecnologías de cultivo y procesamiento adaptadas a diferentes contextos, y la necesidad de garantizar calidad y seguridad de los productos generados. En este escenario, y dado que no es realista esperar un salto inmediato hacia la industrialización global, una estrategia viable consiste en impulsar proyectos locales que evalúen especie por especie su potencial, estudien su crecimiento bajo diversas condiciones y documenten cómo varía su composición química a lo largo de su ciclo de vida. Este enfoque, adaptado a las particularidades productivas, ambientales y regulatorias de cada región, permitiría generar el conocimiento y la infraestructura necesarios para un aprovechamiento sostenible. A largo plazo, este camino podría consolidar a *Sargassum* como un recurso clave dentro de la economía azul, contribuyendo tanto a la innovación industrial como a la gestión responsable de los ecosistemas marinos.

REFERENCIAS

- Abd El-Hamid, H. T., AlProl, A. E., & Hafiz, M. A. (2022). The efficiency of adsorption modelling and Plackett-Burman design for remediation of crystal violet by *Sargassum latifolium*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *44*, 102459.
- Abdulwahid, A. S., Mohammed, F., Hadi, M., Noori, S. D., Shakir, M. N., Hamoodah, Z. J., & Ahmed, N. M. (2023). Investigating the Nitrate Absorption Capacities of *Sargassum Polycystum* Biomass. *Journal of Chemical Health Risks*, *13*(4).
- Affan, H., Touati, K., Benzaama, M. H., Chateigner, D., & El Mendili, Y. (2023). Earth-based building incorporating *Sargassum muticum* seaweed: mechanical and hygrothermal performances. *Buildings*, *13*(4), 932.
- Afrin, F., Islam, M. M., Rasul, M. G., Sarkar, M. S. I., Yuan, C., & Shah, A. K. M. A. (2023). Effects of seaweed extracts on the quality and shelf life of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during frozen storage. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100388.

- Ahmed, H. B., Helal, M. H., Abdo, M. H., Fekry, M. M., & Abdelhamid, A. E. (2021). Disarmament of micropollutants from wastewater using nylon waste/chitosan blended with algal biomass as recoverable membrane. *Polymer Testing*, *104*, 107381.
- Akbarzadeh, S., Gholampour, H., Farzadinia, P., Daneshi, A., Ramavandi, B., Moazzeni, A., ... & Bargahi, A. (2018). Anti-diabetic effects of *Sargassum oligocystum* on Streptozotocin-induced diabetic rat. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, *21*(3), 342.
- Al-Aadily, I. R. J., Bajilan, S. I., Al-Koofee, D. A., & Al-Marzoqi, A. H. (2022). Anticancer effect of *Sargassum oligocystum* hydroalcoholic extract against SW742, HT-29, WiDr, and CT-26 colorectal cancer cell lines and expression of P53 and APC genes. *Journal of Gastrointestinal Cancer*, 1-5.
- Albayari, M., Nordin, N., Adnan, R., Khalili, F., & Nazal, M. (2024). Assessing the sorption of uranium and thorium from simulated solutions using chemically treated biomass of *Sargassum aquifolium* macroalgae. *Environmental Engineering Research*, *29*(6).
- Albratty, M., Alhazmi, H. A., Meraya, A. M., Najmi, A., Alam, M. S., Rehman, Z., & Moni, S. S. (2021). Spectral analysis and Antibacterial activity of the bioactive principles of *Sargassum tenerrimum* J. Agardh collected from the Red sea, Jazan, Kingdom of Saudi Arabia. *Brazilian Journal of Biology*, *83*, e249536.
- Ali, A. H., Said, E. M., & Abdelgawad, Z. A. (2022). The role of seaweed extract on improvement drought tolerance of wheat revealed by osmoprotectants and DNA (cpDNA) markers. *Brazilian Journal of Botany*, *45*(3), 857-867.
- Al-Khalaifah, H. S., & Al-Nasser, A. Y. (2024). Evaluating the Potential of Marine Algae as Sustainable Ingredients in Poultry Feed. *Agriculture*, *14*(11), 1889.
- Almutairi, F. M., El Rabey, H. A., Alalawy, A. I., Salama, A. A., Tayel, A. A., Mohammed, G. M., ... & Zayed, M. M. (2021). Application of chitosan/alginate nanocomposite incorporated with phyco-synthesized iron nanoparticles for efficient remediation of chromium. *Polymers*, *13*(15), 2481.
- Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., Chablé-Villacís, R., Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Canché-Escamilla, G., ... & Tapia-Tussell, R. (2020). Presence of polyphenols complex aromatic “lignin” in *Sargassum* spp. from Mexican Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(1), 6.

- Amador-Castro, F., García-Cayuela, T., Alper, H. S., Rodriguez-Martinez, V., & Carrillo-Nieves, D. (2021). Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. *Journal of Environmental Management*, 283, 112013.
- Antonisamy, A. J., & Rajendran, K. (2024). Comparative study on the extraction methods, characterization, and bioactivity of crude fucoidan, a polysaccharide derived from *Sargassum ilicifolium*. *Biochemical Engineering Journal*, 209, 109398.
- Armeli-Minicante, S., Michelet, S., Bruno, F., Castelli, G., Vitale, F., Sfriso, A., ... & Genovese, G. (2016). Bioactivity of phycocolloids against the mediterranean protozoan *Leishmania infantum*: An inceptive study. *Sustainability*, 8(11), 1131.
- Arunkumar, K., Raj, R., Raja, R., & Carvalho, I. S. (2021). Brown seaweeds as a source of anti-hyaluronidase compounds. *South African Journal of Botany*, 139, 470-477.
- Asencios, Y. J. O., Parreira, L. M., Perpetuo, E. A., & Rotta, A. L. (2022). Characterization of seaweeds collected from Baixada Santista littoral, and their potential uses as biosorbents of heavy metal cations. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(1), IA2600-IA2600.
- Attokkaran, J. R., Beere, H. K., Samage, A., Maraddi, A. S., Ghosh, D., & Nataraj, S. K. (2024). Deep eutectic solvent-mediated synthesis of CuCo₂O₄@ Sargassum tenerrimum derived carbon heterostructure as an efficient electrocatalyst for oxygen and hydrogen evolution reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 554-561.
- Baba, B. M., Mustapha, W. A. W., & Joe, L. S. (2018). Effect of extraction methods on the yield, fucose content and purity of fucoidan from *Sargassum* sp. obtained from Pulau Langkawi, Malaysia. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 22(1), 87-94.
- Bae, S., Al Masud, M. A., Annamalai, S., & Shin, W. S. (2024). The inherent nature of N/P heteroatoms in *Sargassum fusiforme* seaweed biochar enhanced the nonradical activation of peroxymonosulfate for acetaminophen degradation in aquatic environments. *Chemosphere*, 356, 141877.
- Bai, M. T., Anudeep, Y. V., Raju, C. A., Rao, P. V., & Chittibabu, N. (2021). Decolourization of Eosin yellow (EY) dye using a variety of brown algae. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1130-1137.
- Bai, Y., Fu, Y., Chen, K., Sun, Y., Zhou, C., Han, J., & Yan, X. (2024). The dietary supplementation of *Sargassum fusiforme* can effectively alleviate high-fat diet induced metabolic abnormalities. *Algal Research*, 83, 103722.

- Bakhshan, Y., Samari, F., Ghaemi, M., Ghafarigousheh, S., & Kakooee, A. (2019). Experimental study on the thermal conductivity of silver nanoparticles synthesized using *Sargassum angostifolium*. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, *43*, 251-257.
- Balaraman, P., Balasubramanian, B., Kaliannan, D., Durai, M., Kamyab, H., Park, S., ... & Maruthupandian, A. (2020). Phyco-synthesis of silver nanoparticles mediated from marine algae *Sargassum myriocystum* and its potential biological and environmental applications. *Waste and Biomass Valorization*, *11*, 5255-5271.
- Balasubramaniam, V., Chelyn, L. J., Vimala, S., Fairulnizal, M. M., Brownlee, I. A., & Amin, I. (2020). Carotenoid composition and antioxidant potential of *Eucheuma denticulatum*, *Sargassum polycystum* and *Caulerpa lentillifera*. *Heliyon*, *6*(8).
- Balboa, E. M., Conde, E., Moure, A., Falqué, E., & Domínguez, H. (2013). In vitro antioxidant properties of crude extracts and compounds from brown algae. *Food chemistry*, *138*(2-3), 1764-1785.
- Balboa, E. M., Li, Y. X., Ahn, B. N., Eom, S. H., Domínguez, H., Jiménez, C., & Rodríguez, J. (2015). Photodamage attenuation effect by a tetraprenyltoluquinol chromane meroterpenoid isolated from *Sargassum muticum*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *148*, 51-58.
- Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2008). Actividad Antifúngica de Polvos, Extractos y Fracciones de *Cestrum nocturnum* L. Sobre el Crecimiento Micelial de *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill. *Revista mexicana de Fitopatología*, *26*(1), 27-31.
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2005). *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC press.
- Barwant, M., Karande, V., Basnet, P., Kumar, D., Sargazi, S., Mirzaei, M., ... & Ghotekar, S. (2024). Insights into the antioxidant and anticancer properties of novel biologically synthesized NiO/Ni₂O₃ nanoparticles using *Sargassum tenerrimum*. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *111*(2), 409-420.
- Belleza, D. F., Wagas, E., Aaron, J. L., Abao Jr, R. S., & Dy, D. (2019). Allelopathic effects of three intertidal marine macrophytes on the growth of *Nanochlorum* sp. *Journal of Environmental Science and Management*, *22*(1).
- Bianco, E. M., Pires, L., Santos, G. K., Dutra, K. A., Reis, T. N., Vasconcelos, E. R., ... & Navarro, D. M. (2013). Larvicidal activity of seaweeds from northeastern Brazil and of a halogenated sesquiterpene against the dengue mosquito (*Aedes aegypti*). *Industrial crops and products*, *43*, 270-275.

- Bilba, K., Potiron, C. O., & Arsène, M. A. (2023). Invasive biomass algae valorization: Assessment of the viability of Sargassum seaweed as pozzolanic material. *Journal of Environmental Management*, 342, 118056.
- Bogie, J., Hoeks, C., Schepers, M., Tiane, A., Cuypers, A., Leijten, F., ... & Mulder, M. (2019). Dietary Sargassum fusiforme improves memory and reduces amyloid plaque load in an Alzheimer's disease mouse model. *Scientific Reports*, 9(1), 4908.
- Bouso, N. C., Brehmer, P., Ndiaye, W., Stiger-Pouvreau, V., Kane, C., Gautier, M., ... & Quack, B. (2024). Unusual holopelagic Sargassum mass beaching in Northwest Africa: Morphotypes, chemical composition, and potential valorisation. *Science of The Total Environment*, 955, 177018.
- Bouzenad, N., Ammouchi, N., Chaib, N., Belhocine, Y., Belhaoues, A., Hamrouche, N., ... & Zahnit, W. (2024). Development of Bioplastic Films from Sargassum muticum Alginate: Properties and Applications in Food Packaging.
- Buhani, B., Prayogo, A. B., Suharso, S., Sumadi, S., & Sutarto, S. (2024). Application of modified Sargassum dupilcatum biomass as an eco-friendly adsorbent for removing coomassie brilliant blue and phosphate ions from solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-20.
- Buschmann, A. H., & Camus, C. (2019). An introduction to farming and biomass utilisation of marine macroalgae. *Phycologia*, 58(5), 443-445.
- Buschmann, A. H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, Á., Hernández-González, M. C., ... & Critchley, A. T. (2017). Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. *European Journal of Phycology*, 52(4), 391-406.
- Cabello-Galindo, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Cid-Ibarra, G., González-Gloria, K. D., Belmares, R., Govea-Salas, M., ... & Ruiz, H. A. (2024). Bioprocess Design and Evaluation of Hydrothermal Hydrolysates from Sargassum sp. for Enhancing Arthrospira platensis Growth and Protein Content. *Processes*, 12(6), 1122.
- Cao, L., Lee, B., Lee, B. H., Lee, S., & Kim, H. R. (2024). Sargahydroquinic acid from Sargassum macrocarpum attenuates TNF- α and UV-induced skin aging in human dermal fibroblasts. *Algal Research*, 78, 103410.

- Cardoso, S. L., Costa, C. S. D., da Silva, M. G. C., & Vieira, M. G. A. (2020). Insight into zinc (II) biosorption on alginate extraction residue: Kinetics, isotherm and thermodynamics. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103629
- Cardoso, S.M., Carvalho, L.G., Silva, P.J., Rodrigues, M.S., Pereira, O.R., & Pereira, L. (2014). Bioproducts from seaweeds: a review with special focus on the Iberian Peninsula. *Current Organic Chemistry*, 18(7), 896-917.
- Cardoso, S. M., Pereira, O. R., Seca, A. M., Pinto, D. C., & Silva, A. M. (2015). Seaweeds as preventive agents for cardiovascular diseases: From nutrients to functional foods. *Marine Drugs*, 13(11), 6838-6865.
- Carvalho, R. P., Pasqual, M., Silveira, H. D. O., Melo, P. D., Bispo, D. F. A., Laredo, R. R., & Lima, L. D. A. (2019). Niágara Rosada” table grape cultivated with seaweed extracts: physiological, nutritional, and yielding behavior. *Journal of Applied Phycology*, 31(3), 2053-2064.
- Chahbi, M., Mortadi, A., El Moznine, R., Monkade, M., Zaim, S., Nmila, R., & Rchid, H. (2024). A new approach to investigate the hydration process and the effect of algae powder on the strength properties of cement paste. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 22(1), 123-132.
- Chakraborty, K., & Joseph, D. (2018). Effects of antioxidative substances from seaweed on quality of refined liver oil of leafscale gulper shark, *Centrophorus squamosus* during an accelerated stability study. *Food Research International*, 103, 450-461.
- Chakraborty, K., & Maneesh, A. (2020). Marine-derived polygalactofucan and its β -2-deoxy-amino-substituted glucopyranan composite attenuate 3-hydroxy-3-methylglutaryl-CoA reductase: prospective natural anti-dyslipidemic leads. *Medicinal Chemistry Research*, 29, 281-300.
- Chathuranga, K., Weerawardhana, A., Dodantenna, N., Ranathunga, L., Cho, W. K., Ma, J. Y., & Lee, J. S. (2021). Inhibitory effect of *Sargassum fusiforme* and its components on replication of respiratory syncytial virus in vitro and in vivo. *Viruses*, 13(4), 548.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., ... & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic *Sargassum* spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: challenges and opportunities. *Water*, 12(10), 2908.
- Chen, B., Chen, H., Qiao, K., Xu, M., Wu, J., Su, Y., ... & Wang, Q. (2024). Anti-Melanogenic Activities of *Sargassum fusiforme* Polyphenol-Rich Extract on α -MSH-Stimulated B16F10 Cells via PI3K/Akt and MAPK/ERK Pathways. *Foods*, 13(22), 3556.

- Chen, W., Cao, W., Pi, X., Liu, Z., Li, Z., Li, J., ... & Li, Y. (2024). Fe₇C₃ nanoparticles anchored on N-doped biochar as electrocatalyst for highly efficient oxygen evolution reaction. *Fuel*, 358, 130218.
- Chen, Y., Zhu, F., Ou, J., Chen, J., Liu, X., Li, R., ... & Zhong, S. (2024). Mitochondrion-targeted selenium nanoparticles stabilized by *Sargassum fusiforme* polysaccharides increase reactive oxygen species-mediated antitumour activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136545.
- Chikani-Cabrera, K. D., Fernandes, P. M. B., Tapia-Tussell, R., Parra-Ortiz, D. L., Hernández-Zárate, G., Valdez-Ojeda, R., & Alzate-Gaviria, L. (2022). Improvement in methane production from pelagic sargassum using combined pretreatments. *Life*, 12(8), 1214.
- Choi, Y. Y., Lee, S. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Kim, D. H., & Lee, S. S. (2019). *The potential nutritive value of Sargassum fulvellum as a feed ingredient for ruminants. Algal Res 45: 101761.*
- Coelho, S. L. A., Resende, S. V., & de Castro Nunes, J. M. (2017). Utilização de *Sargassum vulgare* C. Agardh na adubação de *Helianthus annuus* L. (girassol). *Acta Botanica Malacitana*, 42(2), 187-192.
- Collins, K. G., Fitzgerald, G. F., Stanton, C., & Ross, R. P. (2016). Looking beyond the terrestrial: The potential of seaweed derived bioactives to treat non-communicable diseases. *Marine drugs*, 14(3), 60.
- Costa, L. H., Hemmer, J. V., Wanderlind, E. H., Gerlach, O. M. S., Santos, A. L. H., Tamanaha, M. S., ... & Almerindo, G. I. (2020). Green synthesis of gold nanoparticles obtained from algae *Sargassum cymosum*: optimization, characterization and stability. *BioNanoScience*, 10, 1049-1062.
- Cotas, J., Leandro, A., Monteiro, P., Pacheco, D., Figueirinha, A., Gonçalves, A. M., ... & Pereira, L. (2020). Seaweed phenolics: From extraction to applications. *Marine drugs*, 18(8), 384.
- Critchley, A. T., Farnham, W. F., Yoshida, T., & Norton, T. A. (1990). A bibliography of the invasive alga *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt (Fucales; Sargassaceae).
- Cunha dos Santos, T., Pompermayer Machado, L., Pimentel Santos, A. L. V., Campos Martins, R. C., Cavalcanti, D. N., Wolff Bueno, G., ... & Concha Obando, J. M. (2024). Dermocosmetic properties of bioproducts from *Sargassum* macroalgae: chemical aspects, challenges, and opportunities. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1500778.
- da Gama, B. M. V., Silanpää, M., Selvasembian, R., Silva, C. E. D. F., & Meili, L. (2024). Effective adsorptive removal of a cationic dye from aqueous solutions using a biosorbent derived from *Sargassum* sp. *Water Practice & Technology*, 19(1), 263-280.

- de Carvalho, R. P., Pasqual, M., de Oliveira Silveira, H. R., de Melo, P. C., Bispo, D. F. A., Laredo, R. R., & de Aguiar Saldanha Lima, L. (2019). “Niágara Rosada” table grape cultivated with seaweed extracts: physiological, nutritional, and yielding behavior. *Journal of applied phycology*, 31, 2053-2064.
- de Moraes, M. J. B., Lyra, G. P., Spósito, C. C. A., Gavioli, L. M., da Silva Parente, I. M., Bueno, C., ... & Rossignolo, J. A. (2024). Seaweed waste in eco-friendly construction materials: Valorization of Sargassum ash as a mineral addition in fiber cements. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100117.
- N'Yeurt, A. R., & Iese, V. (2015). The proliferating brown alga *Sargassum polycystum* in Tuvalu, South Pacific: assessment of the bloom and applications to local agriculture and sustainable energy. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 2037.
- Deepak, P., Perumal, P., Balakrishnan, R., Balasubramanian, B., & Velmurugan, P. (2024). Assessment of antioxidant and digestive enzyme inhibition by phyco-molecules isolated from marine brown alga *Sargassum wightii*. *Food and Humanity*, 2, 100226.
- Devi GV, Y., Nagendra, A. H., Shenoy P, S., Chatterjee, K., & Venkatesan, J. (2022). Fucoidan-incorporated composite scaffold stimulates osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells for bone tissue engineering. *Marine Drugs*, 20(10), 589.
- Dewi, Y. L., Yuniza, A., Nuraini, N., & Mahata, M. E. (2018). Immersion of *Sargassum binderi* seaweed in river water flow to lower salt content before use as feed for laying hens. *International Journal of Poultry Science*, 17(1), 22-27.
- Dhas, T. S., Kumar, V. G., Karthick, V., Vasanth, K., Singaravelu, G., & Govindaraju, K. (2016). Effect of biosynthesized gold nanoparticles by *Sargassum swartzii* in alloxan induced diabetic rats. *Enzyme and microbial technology*, 95, 100-106.
- Dias, M. K. H. M., Madusanka, D. M. D., Han, E. J., Kim, H. S., Jeon, Y. J., Jee, Y., ... & Ahn, G. (2021). *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh ethanol extract attenuates fine dust-induced inflammatory responses and impaired skin barrier functions in HaCaT keratinocytes. *Journal of Ethnopharmacology*, 273, 114003.
- Díaz, O., & Aguilar, C. C. R. B. (2018). Los pesticidas; clasificación, necesidad de un manejo integrado y alternativas para reducir su consumo indebido: una revisión. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(2), 14-30.

- Dobaradaran, S., Babaei, A. A., Nabipour, I., Tajbakhsh, S., Noshadi, S., Keshtkar, M., ... & Esfahani, N. M. (2017). Determination of fluoride biosorption from aqueous solutions using *Sargassum hystrix* algae. *Desalination and Water Treatment*, *63*, 87-95.
- Dumilag, R. V., Malto, M. A. D., Longavela, M. R., Orgela, E. G., Calaminos, F. P., Legarde, F. G., ... & Mendoza, L. C. (2023). Seaweed Fish Baits in Bulusan, Sorsogon, Philippines. *Philippine Journal of Science*, *152*(3).
- Egodavitharana, D. I., Manikkrama, S., Bambaranda, B. V. A. S. M., & Mudannayake, D. C. (2024). Utilization of *Sargassum crassifolium* seaweed powder as a functional ingredient in wheat noodles. *Journal of Applied Phycology*, *36*(5), 2903-2915.
- Elizalde-Mata, A., Trejo-Caballero, M. E., Yáñez-Jiménez, F., Bahena, D., Esparza, R., López-Miranda, J. L., & Estevez, M. (2024). Assessment of Caribbean *Sargassum* species for nanocellulose foams production: An effective and environmentally friendly material to water-emerging pollutants removal. *Separation and Purification Technology*, *341*, 126627.
- El-Sayed, H., Abdelsalam, A., Morad, M. Y., Sonbol, H., Ibrahim, A. M., & Tawfik, E. (2024). Phyto-synthesized silver nanoparticles from *Sargassum subrepandum*: anticancer, antimicrobial, and molluscicidal activities. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1403753.
- Escobar, B., Baas-López, J. M., Tapia-Tussell, R., & Olguín-Maciél, E. (2024). Biochar-packed biofilter for the treatment of gases produced by accumulated *Sargassum* waste. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *23* (2), 1-8.
- FAO (2016). *The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome, Italy. 200 pp.
- Fauzan, R. M. N., Thangunpai, K., Nakagawa-Izumi, A., Kajiyama, M., & Enomae, T. (2024). Preparation of marine-sourced alginate fibres to produce composite paper from both green and blue carbons. *RSC Sustainability*, *3*(1), 599-610.
- Fauziyah, N., Fermanto, Amin, M. N. G., Alamsjah, M. A., Subekti, S., & Pujiastuti, D. Y. (2021). Postharvest processing of *Sargassum duplicatum* for tea products. *Journal of Applied Phycology*, *33*, 1209-1216.
- Félix, R., Félix, C., Januário, A. P., Carmona, A. M., Baptista, T., Gonçalves, R. A., ... & Lemos, M. F. (2020). Tailoring shrimp aquafeed to tackle Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease by inclusion of industry-friendly seaweed extracts. *Aquaculture*, *529*, 735661.

- Fernando, I. P. S., Dias, M. K. H. M., Madusanka, D. M. D., Han, E. J., Kim, M. J., Heo, S. J., & Ahn, G. (2021). Fucoidan fractionated from *Sargassum coreanum* via step-gradient ethanol precipitation indicate promising UVB-protective effects in human keratinocytes. *Antioxidants*, *10*(3), 347.
- Fernando, I. P. S., Sanjeeva, K. K. A., Lee, H. G., Kim, H. S., Vaas, A. P. J. P., De Silva, H. I. C., ... & Jeon, Y. J. (2020). Characterization and cytoprotective properties of *Sargassum natans* fucoidan against urban aerosol-induced keratinocyte damage. *International Journal of Biological Macromolecules*, *159*, 773-781.
- Figuroa Ramírez, S. J., Escobar Morales, B., Pantoja Velueta, D. A., Sierra Grajeda, J. M. T., Alonso Lemus, I. L., & Aguilar Ucán, C. A. (2024). Green synthesis of copper nanoparticles using *sargassum* spp. for electrochemical reduction of CO₂. *ChemistryOpen*, *13*(5), e202300190.
- Francoeur, M., Ferino-Pérez, A., Yacou, C., Jean-Marius, C., Emmanuel, E., Chérémond, Y., ... & Gaspard, S. (2021). Activated carbon synthesized from *Sargassum* (sp) for adsorption of caffeine: Understanding the adsorption mechanism using molecular modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(1), 104795.
- Francoeur, M., Yacou, C., Petit, E., Granier, D., Flaud, V., Gaspard, S., ... & Ayral, A. (2023). Removal of antibiotics by adsorption and catalytic ozonation using magnetic activated carbons prepared from *Sargassum* sp. *Journal of Water Process Engineering*, *53*, 103602.
- Gad, N. S. (2016). Biosorption of rare earth elements using biomass of *Sargassum* on El-Atshan Trachytic sill, Central Eastern Desert, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, *25*(4), 445-451.
- Gan, L. J., Chen, S., Chen, W., Ye, Y., Lei, L., Deng, Z., & Rong, H. (2023). Effect of particle size of *Sargassum fusiforme* residue powder on sugar-free cookies properties. *LWT*, *182*, 114826.
- Gheda, S., Hamouda, R. A., Naby, M. A., Mohamed, T. M., Al-Shaikh, T. M., & Khamis, A. (2023). Potent effect of phlorotannins derived from *Sargassum linifolium* as antioxidant and antidiabetic in a streptozotocin-induced diabetic rats model. *Applied Sciences*, *13*(8), 4711.
- Gnanavel, J. R. S., & Vignesh, N. J. (2023). Evaluation and testing of emission on *Sargassum wightii*-based flash powder composition. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(35), 84243-84253.
- Govindaraju, K., Krishnamoorthy, K., Alsagaby, S. A., Singaravelu, G., & Premanathan, M. (2015). Green synthesis of silver nanoparticles for selective toxicity towards cancer cells. *IET nanobiotechnology*, *9*(6), 325-330.
- Graham, L. & L.W. Wilcox. (2000). *Algae*. Pearson Education Inc. Second Edition San Francisco.

- Graich, A., EL Haloui, Y., Rchid, H., Nmila, R., Siniti, M., Mrani, I., ... & Zradba, A. (2024). Use of *Sargassum muticum* algae as binder strengthening for raw earth mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(1), 95-107.
- Guillerme, J. B., Couteau, C., & Coiffard, L. (2017). Applications for marine resources in cosmetics. *Cosmetics*, 4(3), 35.
- Guiry, M. D. & G. M. Guiry. (2010). AlgaeBase version 4.2. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, <http://www.algaebase.org>; searched on 5 February 2010.
- Guiry, M. D. & G. M. Guiry. (2022 & 2025). AlgaeBase version 4.2. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, <http://www.algaebase.org>.
- Han, C., Xia, B., Chen, X., Shen, J., Miao, Q., & Shen, Y. (2016). Determination of four paraben-type preservatives and three benzophenone-type ultraviolet light filters in seafoods by LC-QqLIT-MS/MS. *Food chemistry*, 194, 1199-1207.
- Han, E. J., Kim, H. S., Jung, K., Sanjeeva, K. K. A., Herath, K. H. I. N. M., Lee, W., ... & Ahn, G. (2021). *Sargassum horneri* ethanol extract ameliorates TNF- α /IFN- γ -induced inflammation in human keratinocytes and TPA-induced ear edema in mice. *Food Bioscience*, 39, 100831.
- Han, S. C., Kang, N. J., Yoon, W. J., Kim, S., Na, M. C., Koh, Y. S., ... & Yoo, E. S. (2016). External application of Apo-9'-fucoxanthinone, isolated from *Sargassum muticum*, suppresses inflammatory responses in a mouse model of atopic dermatitis. *Toxicological research*, 32, 109-114.
- Hanif, N., & Idrissi, M. C. (2014). Study of *Gelidium sesquipedale* overexploitation effects on *Sargassum muticum* proliferation of in El Jadida area, Morocco. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 8(2), 283-290.
- Hanjabam, M. D., Zynudheen, A. A., Ninan, G., & Panda, S. (2017). Seaweed as an ingredient for nutritional improvement of fish jerky. *Journal of food processing and preservation*, 41(2), e12845.
- Hao-Miao, D. I. N. G., Rui-Jie, F. U., Ce, X. I. E., Cai-Sheng, W. A. N. G., & Guo-Ying, Q. I. A. N. (2021). Transcriptomic profile of human erythroleukemia cells in response to *Sargassum fusiforme* polysaccharide and its structure analysis. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 19(10), 784-795.
- Hasan, I. M., Assaf, F. H., & Tawfik, A. R. (2024). Sustainable synthesis of magnetic *Sargassum siliquastrum* activated carbon loaded with NiS nanorods for adsorption of 2, 4-D herbicide. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 13246-13269.

- Herath, K. H. I. N. M., Kim, H. J., Lee, J. H., Je, J. G., Yu, H. S., Jeon, Y. J., ... & Jee, Y. (2021). Sargassum horneri (Turner) C. Agardh containing polyphenols attenuates particulate matter-induced inflammatory response by blocking TLR-mediated MYD88-dependent MAPK signaling pathway in MLE-12 cells. *Journal of Ethnopharmacology*, 265, 113340.
- Hessami, M. J., Phang, S. M., Salleh, A., & Rabiei, R. (2018). Evaluation of tropical seaweeds as feedstock for bioethanol production. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5), 977-992.
- Hsin-I Feng, C. (2012). The tale of sushi: history and regulations. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11(2), 205-220.
- Hu, C., Murch, B., Barnes, B. B., Wang, M., Maréchal, J. P., Franks, J., ... & Siuda, A. (2016). Sargassum watch warns of incoming seaweed. *Eos*, 97(22), 10-15.
- Hu, F., Yang, M., Ding, P., Zhang, X., Chen, Z., Ding, J., ... & Chang, Y. (2020). Effects of the brown algae Sargassum horneri and Saccharina japonica on survival, growth and resistance of small sea urchins Strongylocentrotus intermedius. *Scientific Reports*, 10(1), 12495.
- Hu, J., Yao, W., Chang, S., You, L., Zhao, M., Cheung, P. C. K., & Hileuskaya, K. (2022). Structural characterization and anti-photoaging activity of a polysaccharide from Sargassum fusiforme. *Food Research International*, 157, 111267.
- Hu, M., Cui, N., Bo, Z., & Xiang, F. (2017). Structural determinant and its underlying molecular mechanism of STPC2 related to anti-angiogenic activity. *Marine Drugs*, 15(2), 48.
- Hu, P., Shi, Q., Wen, Z., Wang, J., & Qin, C. (2024). Potential effects of Sargassum kjellmanianum as a dietary supplement on the growth performance, immunity response, antioxidant status, and ammonia resistance of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquaculture Reports*, 36, 102181.
- Huang, C. Y., Huang, C. Y., Yang, C. C., Lee, T. M., & Chang, J. S. (2022). Hair growth-promoting effects of Sargassum glaucescens oligosaccharides extracts. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 134, 104307.
- Huang, H., Chen, Y., Ma, R., Luo, J., Sun, S., Lin, J., & Wang, Y. (2023). Preparation of high performance porous carbon by microwave synergistic nitrogen/phosphorus doping for efficient removal of Cu²⁺ via capacitive deionization. *Environmental Research*, 222, 115342.

- Huang, W., Chen, Y., Hu, J., Yao, W., You, L., & Cheung, P. C. K. (2022). Algal sulfated polysaccharide-based hydrogels enhance gelling properties and in vitro wound healing compared to conventional hydrogels. *Algal Research*, *65*, 102740.
- Hung, C. M., Chen, C. W., Huang, C. P., Cheng, J. W., & Dong, C. D. (2022). Algae-derived metal-free boron-doped biochar as an efficient bioremediation pretreatment for persistent organic pollutants in marine sediments. *Journal of Cleaner Production*, *336*, 130448.
- Hurtado, A. Q., Neish, I. C., & Critchley, A. T. (2019). Phyconomy: the extensive cultivation of seaweeds, their sustainability and economic value, with particular reference to important lessons to be learned and transferred from the practice of eucheumatoid farming. *Phycologia*, *58*(5), 472-483.
- Hwang, E. K., Yotsukura, N., Pang, S. J., Su, L., & Shan, T. F. (2019). Seaweed breeding programs and progress in eastern Asian countries. *Phycologia*, *58*(5), 484-495.
- Janarthanan, M., & Senthil-Kumar, M. (2018). The properties of bioactive substances obtained from seaweeds and their applications in textile industries. *Journal of Industrial Textiles*, *48*(1), 361-401.
- Jayawardena, T. U., Kim, H. S., Sanjeeva, K. A., Han, E. J., Jee, Y., Ahn, G., ... & Jeon, Y. J. (2021). Loliolide, isolated from *Sargassum horneri*; abate LPS-induced inflammation via TLR mediated NF- κ B, MAPK pathways in macrophages. *Algal Research*, *56*, 102297.
- Je, J. G., Kim, C. Y., Sim, J., Roh, Y., Kurera, M. J. M. S., Liyanage, N. M., ... & Ryu, B. (2024). Anti-inflammatory activity and structural analysis of fucoidan extracted from *Sargassum fusiforme* via ESI-TOF MS spectrometry. *Food Bioscience*, *60*, 104414.
- Jesus, B. C., de Miera, B. S., Santiago, R., Martins, A., Pedrosa, R., González-Miquel, M., & Marrucho, I. M. (2023). Valorisation of *Sargassum muticum* through the extraction of phenolic compounds using eutectic solvents and intensification techniques. *RSC Sustainability*, *1*(5), 1245-1258.
- Jia, X., Guo, F., Zhan, Y., Zhou, H., Jiang, X., & Qian, L. (2020). Synthesis of porous carbon materials with mesoporous channels from *Sargassum* as electrode materials for supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *873*, 114353.
- Júnior, W. J. D. N., Landers, R., da Silva, M. G. C., & Vieira, M. G. A. (2021). Equilibrium and desorption studies of the competitive binary biosorption of silver (I) and copper (II) ions on brown algae waste. *Journal of environmental chemical engineering*, *9*(1), 104840.

- Kammler, S., Romero, A. M., Burkhardt, C., Baruth, L., Antranikian, G., Liese, A., & Kaltschmitt, M. (2024). Macroalgae valorization for the production of polymers, chemicals, and energy. *Biomass and Bioenergy*, *183*, 107105.
- Kang, J. W., Hyun, S. H., Kim, H. M., Park, S. Y., Lee, J. A., Lee, I. C., & Bae, J. S. (2024). The effects of fucoidan-rich polysaccharides extracted from *Sargassum horneri* on enhancing collagen-related skin barrier function as a potential cosmetic product. *Journal of Cosmetic Dermatology*, *23*(4), 1365-1373.
- Karkhane, M., Lashgarian, H. E., Mirzaei, S. Z., Ghaffarizadeh, A., Cherghipour, K., Sepahvand, A., & Marzban, A. (2020). *Antifungal, antioxidant and photocatalytic activities of zinc nanoparticles synthesized by Sargassum vulgare extract. Biocatal Agric Biotechnol* *29*: 101791.
- Karthikeyan, A., Joseph, A., & Nair, B. G. (2022). Promising bioactive compounds from the marine environment and their potential effects on various diseases. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, *20*(1), 14.
- Khairy, H. M., & El-Shafay, S. M. (2013). Seasonal variations in the biochemical composition of some common seaweed species from the coast of Abu Qir Bay, Alexandria, Egypt. *Oceanologia*, *55*(2), 435-452.
- Khalafu, S. H. S., Aida, W. M. W., Lim, S. J., & Maskat, M. Y. (2017). Effects of deodorisation methods on volatile compounds, chemical properties and antioxidant activities of fucoidan isolated from brown seaweed (*Sargassum* sp.). *Algal research*, *25*, 507-515.
- Khorami, F., Babaei, S., Valizadeh, S., Naseri, M., & Golmakani, M. T. (2024). Bilayer coatings for extension of the shelf life of fish fillets: Incorporating seaweed sulfated polysaccharides in chitosan-alginate LbL structures. *Food Science & Nutrition*, *12*(4), 2511-2522.
- Kim, H. J., Park, C., Kim, G. Y., Park, E. K., Jeon, Y. J., Kim, S., ... & Choi, Y. H. (2018). *Sargassum serratifolium* attenuates RANKL-induced osteoclast differentiation and oxidative stress through inhibition of NF- κ B and activation of the Nrf2/HO-1 signaling pathway. *BioScience Trends*, *12*(3), 257-265.
- Kim, H. S., Wang, L., Fernando, I. P. S., Je, J. G., Ko, S. C., Kang, M. C., ... & Lee, D. S. (2020). Antioxidant efficacy of (-)-loliolide isolated from *Sargassum horneri* against AAPH-induced oxidative damage in Vero cells and zebrafish models in vivo. *Journal of Applied Phycology*, *32*, 3341-3348.

- Kim, K. B. W. R., Kim, M. J., & Ahn, D. H. (2014). Lipase inhibitory activity of chlorophyll a, isofucoesterol and saringosterol isolated from chloroform fraction of *Sargassum thunbergii*. *Natural Product Research*, 28(16), 1310-1312.
- Kim, K. W., Chung, D., Jung, S. H., Kwon, Y. M., Kim, J. Y. H., & Baek, K. (2022). Antimicrobial effect of carbon nanodots–ZnO nanocomposite synthesized using *Sargassum horneri*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1546.
- Koh, E. J., Shin, K. S., Sunwoo, I. Y., Kim, J., & Choi, W. Y. (2024). Brown seaweed byproduct extracts improve intestinal motility and auto-inflammation in mice with loperamide-induced constipation. *Foods*, 13(13), 2037.
- Kok, J. M. L., Jee, J. M., Chew, L. Y., & Wong, C. L. (2016). The potential of the brown seaweed *Sargassum polycystum* against *acne vulgaris*. *Journal of Applied Phycology*, 28, 3127-3133.
- Kurinjeri, A., & Kulanthaiyesu, A. (2022). Anti-hyaluronidase and cytotoxic activities of fucoxanthin cis/trans isomers extracted and characterized from 13 brown seaweeds. *Process Biochemistry*, 122, 53-68.
- Lafarga, T., Acién-Fernández, F. G., & Garcia-Vaquero, M. (2020). Bioactive peptides and carbohydrates from seaweed for food applications: Natural occurrence, isolation, purification, and identification. *Algal research*, 48, 101909.
- Lalruatféli, P., Krishnan, R., Janaki, P., Suganthy, M., Djanaguiraman, M., & Kalpana, R. (2024). Hormetic response of blackgram (*Vigna mungo*) seeds treated with organic extract of seaweeds. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 36, 1-10.
- Le Lann, K., Connan, S., & Stiger-Pouvreau, V. (2012). Phenology, TPC and size-fractioning phenolics variability in temperate Sargassaceae (Phaeophyceae, Fucales) from Western Brittany: Native versus introduced species. *Marine Environmental Research*, 80, 1-11.
- Lean, J. S., Wan Mohamad Ali, W. N., Ahmad, R., Mohamed Nor, Z., Wong, C. L., & Ng, J. F. (2023). Size-tunable *Sargassum polycystum* mediated synthesis of silver nanoparticles and its larvicidal effect on *Aedes aegypti*. *Journal of Applied Phycology*, 35(4), 1921-1931.
- Lee, H. G., Jayawardhana, H. H. A. C. K., Yang, F., Nagahawaththa, D. P., Liyanage, N. M., Song, K. M., ... & Kang, M. C. (2024). Anti-obesity effects of fucoïdan from *Sargassum thunbergii* in adipocytes and high fat diet induced obese mice through inhibiting adipogenic specific transcription factor. *Food Science and Human Wellness*, 13(3), 1608-1616.

- Li, D. H., Han, Z. M., He, Q., Yang, K. P., Sun, W. B., Liu, H. C., ... & Yu, S. H. (2023). Ultrastrong, thermally stable, and food-safe seaweed-based structural material for tableware. *Advanced Materials*, 35(1), 2208098.
- Li, S., Tan, X., Li, H., Gao, Y., Wang, Q., Li, G., & Guo, M. (2022). Investigation on pore structure regulation of activated carbon derived from sargassum and its application in supercapacitor. *Scientific Reports*, 12(1), 10106.
- Li, Z. R., Jia, R. B., Wu, J., Lin, L., Ou, Z. R., Liao, B., ... & Zhao, M. (2021). Sargassum fusiforme polysaccharide partly replaces acarbose against type 2 diabetes in rats. *International Journal of Biological Macromolecules*, 170, 447-458.
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P., ... & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *Bmj*, 339.
- Liu, J., Luthuli, S., Yang, Y., Cheng, Y., Zhang, Y., Wu, M., ... & Tong, H. (2020). Therapeutic and nutraceutical potentials of a brown seaweed *Sargassum fusiforme*. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5195-5205.
- Liu, J., Luthuli, S., Yang, Y., Cheng, Y., Zhang, Y., Wu, M., ... & Tong, H. (2020). Therapeutic and nutraceutical potentials of a brown seaweed *Sargassum fusiforme*. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5195-5205.
- Liu, Z., Adewuyi, Y. G., Shi, S., Chen, H., Li, Y., Liu, D., & Liu, Y. (2019). Removal of gaseous Hg⁰ using novel seaweed biomass-based activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 366, 41-49.
- Lodeiro, P., & Sillanpää, M. (2013). Gold recovery from artificial seawater using synthetic materials and seaweed biomass to induce gold nanoparticles formation in batch and column experiments. *Marine Chemistry*, 152, 11-19.
- López-Contreras, A. M., van der Geest, M., Deetman, B., van den Burg, S., Brust, H., & de Vrije, T. (2021). *Opportunities for valorisation of pelagic Sargassum in the Dutch Caribbean* (No. 2137). Wageningen Food & Biobased Research.
- López-Miranda, J. L., Molina, G. A., Esparza, R., González-Reyna, M. A., Silva, R., & Estevez, M. (2022). Ecofriendly and sustainable *Sargassum* spp.-based system for the removal of highly used drugs during the COVID-19 pandemic. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(10), 104169.

- López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., ... & Morales-Máximo, M. (2020). A prospective study of the exploitation of pelagic *Sargassum* spp. as a solid biofuel energy source. *Applied Sciences*, *10*(23), 8706.
- Luna-Pérez, Y., Ríos-López, L. G., Otero-Tejada, E. L., Mejía-Giraldo, J. C., & Puertas-Mejía, M. Á. (2023). *Sargassum filipendula*, a source of bioactive compounds with antioxidant and matrix metalloproteinases inhibition activities in vitro with potential dermocosmetic application. *Antioxidants*, *12*(4), 876.
- Ma, M., Ying, H., Cao, F., Wang, Q., & Ai, N. (2020). Adsorption of congo red on mesoporous activated carbon prepared by CO₂ physical activation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *28*(4), 1069-1076.
- Ma, W. P., Yin, S. N., Chen, J. P., Geng, X. C., Liu, M. F., Li, H. H., ... & Liu, H. B. (2022). Stimulating the hematopoietic effect of simulated digestive product of fucoidan from *Sargassum fusiforme* on cyclophosphamide-induced hematopoietic damage in mice and its protective mechanisms based on serum lipidomics. *Marine Drugs*, *20*(3), 201.
- Madhavaraj, L., Lim, H. D., Kim, K. M., Kim, D. H., & Han, G. H. (2020). Influence of *Sargassum horneri* mitigating odorous gas emissions from swine manure storage facilities. *Sustainability*, *12*(18), 7587.
- Madhiyazhagan, P., Murugan, K., Kumar, A. N., Nataraj, T., Dinesh, D., Panneerselvam, C., ... & Benelli, G. (2015). *Sargassum muticum*-synthesized silver nanoparticles: an effective control tool against mosquito vectors and bacterial pathogens. *Parasitology research*, *114*, 4305-4317.
- Magesh, K. T., Aravindhan, R., Kumar, M. S., & Sivachandran, A. (2020). Antibacterial efficacy of the extract of *Sargassum wightii* against oral pathogen— an in vitro study. *Journal of Orofacial Sciences*, *12*(2), 96-100.
- Manzoor, Z., Mathema, V. B., Chae, D., Yoo, E. S., Kang, H. K., Hyun, J. W., ... & Koh, Y. S. (2014). Extracts of the seaweed *Sargassum macrocarpum* inhibit the CpG-induced inflammatory response by attenuating the NF- κ B pathway. *Food science and biotechnology*, *23*, 293-297.
- Marinho-Soriano, E., Fonseca, P. C., Carneiro, M. A. A., & Moreira, W. S. C. (2006). Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresource technology*, *97*(18), 2402-2406.
- Martínez-Meraz, C., González-Fernández, L. A., Medellín-Castillo, N. A., López-Cruz, C. M., Reyes-Hernández, J., Castillo-Ramos, V., & Sánchez-Polo, M. (2023). *Sargassum* biomass-derived

biochars for ibuprofen removal from water: Adsorption and kinetics. *MRS Advances*, 8(23), 1377-1384.

- Martínez-Martínez, E., Slocum, A. H., Ceballos, M. L., Aponte, P., & Bisonó-León, A. G. (2025). Beyond the Bloom: Invasive Seaweed *Sargassum* spp. as a Catalyst for Sustainable Agriculture and Blue Economy—A Multifaceted Approach to Biodegradable Films, Biostimulants, and Carbon Mitigation. *Sustainability*, 17(8), 3498.
- Martínez-Molina, E. C., Freile-Pelegrián, Y., Ovando-Chacón, S. L., Gutiérrez-Miceli, F. A., Luján-Hidalgo, M. C., Ruiz-Cabrera, M. Á., ... & Abud-Archila, M. (2024). Osmodehydrated papaya coated with *limosilactobacillus fermentum* and sodium alginate extracted from *Sargassum fluitans*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(3), 1748-1758.
- Matanjun, P., Mohamed, S., Mustapha, N. M., & Muhammad, K. (2009). Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheuma cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum*. *Journal of Applied Phycology*, 21, 75-80.
- Mateos, R., Pérez-Correa, J. R., & Domínguez, H. (2020). Bioactive properties of marine phenolics. *Marine drugs*, 18(10), 501.
- Mattio, L., & Payri, C. E. (2011). 190 years of *Sargassum* taxonomy, facing the advent of DNA phylogenies. *The Botanical Review*, 77(1), 31-70.
- Milledge, J. J., Manein, S., Arribas López, E., & Bartlett, D. (2020). *Sargassum* inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*, 13(6), 1523.
- Moni, S. S., Alam, M. F., Makeen, H. A., Jabeen, A., Sanobar, S., Siddiqui, R., ... & Fouda, S. (2018). Therapeutic potential of oleic acid nanovesicles prepared from petroleum ether extract of *Sargassum binderi* in streptozotocin-induced diabetic wound in Wistar rats. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 17(11), 2123-2128.
- Monroy-Velázquez, L. V., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Aguiar, T., Solís-Weiss, V., & Briones-Fourzán, P. (2019). Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon. *Journal of environmental management*, 252, 109650.
- Montesinos, Y. E. R., Silva, V. A. V., Ochoa, M. M., & Higuera, D. L. A. (2022). Partial characterization and biological activity of *Sargassum lapazeanum* (Fucales, Phaeophyceae): Biological activity of *Sargassum lapazeanum*. *Hidrobiológica*, 32(3).

- Mostafa, Y. S., Alamri, S. A., Alrumman, S. A., Hashem, M., Taher, M. A., & Baka, Z. A. (2022). In vitro and in vivo biocontrol of tomato Fusarium wilt by extracts from brown, red, and green macroalgae. *Agriculture*, *12*(3), 345.
- Muthezhilan, R., Ravikumar, V., Karthik, R., & Hussain, A. J. (2014). Development of seaweed liquid fertilizer (SLF) consortium for the enhancement of agriculturally important crop plants. *Biosci Biotechnol Res Asia*, *11*, 253-261.
- N'Yeurt, A.R, & Iese, V. (2015). The proliferating brown alga *Sargassum polycystum* in Tuvalu, South Pacific: assessment of the bloom and applications to local agriculture and sustainable energy. *Journal of Applied Phycology*, *27*(5), 2037.
- Natsir, S., Rosyida, E., & Yala, Z. R. (2017). Toxicity of liquid extract of seaweed *Sargassum* sp. on the growth of microalgae *Skeletonema costatum*. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, *10*(2), 247-253.
- Nayar, S., & Bott, K. (2014). Current status of global cultivated seaweed production and markets. *World Aquaculture*, *45*(2), 32-37.
- Nazarudin, M. F., Paramisparam, A., Khalid, N. A., Albaz, M. N., Shahidan, M. S., Yasin, I. S. M., ... & Aliyu-Paiko, M. (2020). Metabolic variations in seaweed, *Sargassum polycystum* samples subjected to different drying methods via ¹H NMR-based metabolomics and their bioactivity in diverse solvent extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, *13*(11), 7652-7664.
- Neori, A., Troell, M., Chopin, T., Yarish, C., Critchley, A., & Buschmann, A. H. (2007). The need for a balanced ecosystem approach to blue revolution aquaculture. *Environment: science and policy for sustainable development*, *49*(3), 36-43.
- Neto, R. T., Marçal, C., Queirós, A. S., Abreu, H., Silva, A. M., & Cardoso, S. M. (2018). Screening of *Ulva rigida*, *Gracilaria* sp., *Fucus vesiculosus* and *Saccharina latissima* as Functional Ingredients. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(10), 2987.
- Nishikawa, E., da Silva, M. G. C., & Vieira, M. G. A. (2018). Cadmium biosorption by alginate extraction waste and process overview in life cycle assessment context. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 166-175.
- Nurcahyanti, A. D. R., Puika, V. I., Pramitasari, R., & Notario, D. (2021). Bioprospecting brown algae (*Sargassum polycystum* C. Agardh) as a potential antioxidant additive in snack bar and its sensory evaluation. *Food Res*, *5*(6), 58-65.

- Nurcahyanti, A. D. R., Satriawan, N., & Sharopov, F. (2023). Free radical scavenging synergism of fucoxanthin with lipophilic plant products. *Natural product research*, 37(5), 782-787.
- Obeidi, N., Babolei, M. D., Khamisipour, G., Mohammadi, S. A., Farhangdost, F., & Valipor, S. (2023). The Effect of Sargassum Angustifolium-derived AgNPs on Apoptosis-associated Genes in Acute Lymphoblastic Leukemia Cells. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention: APJCP*, 24(8), 2691.
- Oliyaeei, N., Tanideh, N., Moosavi-Nasab, M., Dehghanian, A. R., & Iraj, A. (2023). Development and characterization of a fucoidan-based nanoemulsion using Nigella sativa oil for improvement of anti-obesity activity of fucoxanthin in an obese rat model. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123867.
- Pan, W., Ma, B., Liu, Y., Huang, J., Sun, C., Jiang, X., ... & Luo, P. (2023). Developing artificial mixed diets for larval culture of sea cucumber, *Holothuria leucospilota*, and their effects on the internal microbiota. *Aquaculture Reports*, 33, 101868.
- Parente, I. M. D. S., Lyra, G. P., Bueno, C., Tonin, F. G., & Rossignolo, J. (2024). Holistic Evaluation of Ceramic Clay Properties with Sargassum Spp. Ash Replacement. *Ash Replacement*.
- Park, K. Y., Jo, Y. H., Nejad, J. G., Lee, J. C., & Lee, H. G. (2022). Evaluation of nutritional value of *Ulva* sp. and *Sargassum horneri* as potential eco-friendly ruminants feed. *Algal Res.* 65: 102706.
- Park, S. Y., Kim, B., Kim, Y. J., Kim, H. H., Oh, J. W., & Park, G. (2022). Suppression of adipogenesis by Au nanostructures-conjugated Sargassum seaweed extracts in 3 T3-L1 adipocytes. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(9), 104093.
- Park, S., Cho, S. W., Lee, Y., Choi, M., Yang, J., Lee, H., & Seo, S. W. (2021). Engineering *Vibrio* sp. SP1 for the production of carotenoids directly from brown macroalgae. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 19, 1531-1540.
- Park, Y. M., Lee, H. Y., Shin, D. Y., Kim, S. H., Yoo, Y., Kim, M. J., ... & Park, K. H. (2024). Augmentation of NK-cell activity and immunity by combined natural polyphenols and saccharides in vitro and in vivo. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268, 131908.
- Pekkoh, J., Ruangrit, K., Kaewkod, T., Tragoolpua, Y., Hoijang, S., Srisombat, L., ... & Srinuanpan, S. (2023). Innovative eco-friendly microwave-assisted Rapid Biosynthesis of Ag/AgCl-NPs Coated with Algae Bloom Extract as multi-functional biomaterials with non-toxic effects on Normal Human cells. *Nanomaterials*, 13(14), 2141.

- Pirian, K., Jeliani, Z. Z., Sohrabipour, J., Arman, M., Faghihi, M. M., & Yousefzadi, M. (2018). Nutritional and bioactivity evaluation of common seaweed species from the Persian Gulf. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 42, 1795-1804.
- Pirian, K., Moein, S., Sohrabipour, J., Rabiei, R., & Blomster, J. (2017). Antidiabetic and antioxidant activities of brown and red macroalgae from the Persian Gulf. *Journal of Applied Phycology*, 29, 3151-3159.
- Pourkhalili, K., Karimi, Z., Farzaneh, M. R., Ehsandoost, E., Mohammadi, M., Lotfipour, M., & Akbari, Z. (2021). Renoprotective effect of fucoidan from seaweed *Sargassum angustifolium* C. Agardh 1820 on gentamicin-induced nephrotoxicity: From marine resources to therapeutic uses. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 17(2), e119081.
- Prasedya, E. S., Padi, H., Ilhami, B. T. K., Martyasari, N. W. R., Sunarwidhi, A. L., Widyastuti, S., ... & Frediansyah, A. (2022). Brown macroalgae *Sargassum cristaeifolium* extract inhibits melanin production and cellular oxygen stress in B16F10 melanoma cells. *Molecules*, 27(23), 8585.
- Premarathna, A. D., Wijesekera, S. K., Jayasooriya, A. P., Waduge, R. N., Wijesundara, R. R. M. K. K., Tuvikene, R., ... & Rajapakse, R. P. V. J. (2021). In vitro and in vivo evaluation of the wound healing properties and safety assessment of two seaweeds (*Sargassum ilicifolium* and *Ulva lactuca*). *Biochemistry and biophysics reports*, 26, 100986.
- Pugazhendhi, A., Prabhu, R., Muruganatham, K., Shanmuganathan, R., & Natarajan, S. (2019). Anticancer, antimicrobial and photocatalytic activities of green synthesized magnesium oxide nanoparticles (MgONPs) using aqueous extract of *Sargassum wightii*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 190, 86-97.
- Qi, H., Xu, H., Zhang, J., Xu, Z., Zhong, L., Cui, P., ... & Wang, Y. (2023). Thermodynamic and techno-economic analyses of hydrogen production from different algae biomass by plasma gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(92), 35895-35906.
- Rajan, P., Natraj, P., Kim, N. H., Kim, J. H., Choi, H. J., & Han, C. H. (2023). Effects of *Cudrania tricuspidata* and *Sargassum fusiforme* extracts on hair growth in C57BL/6 mice. *Laboratory Animal Research*, 39(1), 4.
- Raju, N. N., Sankaranarayanan, M., & Bharathiraja, B. (2024). Production of polyhydroxybutyrate (PHB), a biodegradable polymer from seaweed biomass using novel bacterial isolates. *Journal of Molecular Structure*, 1303, 137511.

- Ramani, S., & Murugan, A. (2020). Effect of seaweed coating on quality characteristics and shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum* mill). *Food Science and Human Wellness*, 9(2), 176-183.
- Rezende, P. C., Miranda, C., Fracalossi, D. M., Hayashi, L., Seiffert, W. Q., do Nascimento Vieira, F., & Schleder, D. D. (2022). Brown seaweeds as a feed additive for *Litopenaeus vannamei* reared in a biofloc system improved resistance to thermal stress and white spot disease. *Journal of Applied Phycology*, 34(5), 2603-2614.
- Robledo, D., Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrián, Y., Vázquez-Elizondo, R. M., Qui-Minet, Z. N., & Salazar-Garibay, A. (2021). Challenges and opportunities in relation to Sargassum events along the Caribbean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8, 699664.
- Rodríguez-Quesada, J., Rodríguez-Mora, K., Bernal-Samaniego, C. A., Jirón-García, E. G., & Rojas-Alvarado, C. (2024). Development of Nanocellulose Hydrogels from Sargassum Seaweed as Controlled Nutrient Release Systems and their Application in Germination. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25.
- Rosas, D., Escobar, B., Suarez-Alcantara, K., Pacheco, C., & Barbosa, R. (2024). Functional Sulfur-Doped Biocarbon for Hydrogen Storage: Development of Nanomaterials for Energy Applications. *Processes*, 12(12), 2715.
- Rosas-Medellín, D., Pérez-Salcedo, K. Y., Morales-Acosta, D., Rodríguez-Varela, F. J., & Escobar, B. (2021). Green synthesis of Pt nanoparticles and their application in the oxygen reduction reaction. *Journal of Materials Research*, 36, 4131-4140.
- Roy, D., Sobuj, M. K. A., Islam, M. S., Haque, M. M., Islam, M. A., Islam, M. M., ... & Rafiquzzaman, S. M. (2024). Compositional, structural, and functional characterization of fucoidan extracted from *Sargassum polycystum* collected from Saint Martin's Island, Bangladesh. *Algal Research*, 80, 103542.
- Saghir, S. A., Al Hroob, A. M., Majrashi, K. A., Jaber, F. A., Abduh, M. S., Al-Gabri, N., ... & Simal-Gandara, J. (2023). Effects of alginates on the growth, haematological, immunity, antioxidant and pro-inflammatory responses of rabbits under high temperature. *Research in Veterinary Science*, 155, 36-43.
- Salazar-Cruz, B. A., Zapien-Castillo, S., Hernández-Zamora, G., & Rivera-Armenta, J. L. (2021). Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. *Construction and Building Materials*, 271, 121876.

- Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Seca, A. M., Pinto, D. C., Michalak, I., Trincone, A., ... & Martins, N. (2019). Current trends on seaweeds: Looking at chemical composition, phytopharmacology, and cosmetic applications. *Molecules*, *24*(22), 4182.
- Salunke, M., Wakure, B., & Wakte, P. (2022). HR-LCMS assisted phytochemical screening and an assessment of anticancer activity of *Sargassum Squarrosus* and *Dictyota Dichotoma* using in vitro and molecular docking approaches. *Journal of Molecular Structure*, *1270*, 133833.
- Samir, R., Hassan, E. A., Saber, A. A., Haneen, D. S., & Saleh, E. M. (2023). Seaweed *Sargassum aquifolium* extract ameliorates cardiotoxicity induced by doxorubicin in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(20), 58226-58242.
- Samuvel, R. M. S., Dutta, H., Benisha, R. M., Muralidharan, K., Jain, N., Swain, D., & Ramalingam, V. (2024). Chemopreventive effects of *Sargassum cristaeifolium* against prostate cancer targeting p53-mediated apoptosis signaling pathway: An in vitro and in vivo study. *Food Bioscience*, *61*, 104839.
- Savaghebi, D., Ghaderi-Ghahfarokhi, M., & Barzegar, M. (2021). Encapsulation of *sargassum boveanum* algae extract in nano-liposomes: application in functional mayonnaise production. *Food and Bioprocess Technology*, *14*, 1311-1325.
- Schleder, D. D., Blank, M., Peruch, L. G. B., Poli, M. A., Goncalves, P., Rosa, K. V., ... & Hayashi, L. (2020). Impact of combinations of brown seaweeds on shrimp gut microbiota and response to thermal shock and white spot disease. *Aquaculture*, *519*, 734779.
- Shao, P., Chen, X., & Sun, P. (2013). In vitro antioxidant and antitumor activities of different sulfated polysaccharides isolated from three algae. *International Journal of Biological Macromolecules*, *62*, 155-161.
- Shi, Q., Wang, J., Qin, C., Yu, C., Wang, S., & Jia, J. (2021). Growth performance, serum biochemical parameters, immune parameters and hepatic antioxidant status of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* supplemented with *Sargassum horneri* hot-water extract. *Aquaculture Reports*, *21*, 100839.
- Shin, E., Kim, H. T., Lee, H., Kim, B., Park, J., Park, S., ... & Youn, B. (2024). Low-temperature pulverization-specific *Sargassum horneri* extract accelerates wound healing and attenuates inflammation in a mouse burn model. *Animal Cells and Systems*, *28*(1), 428-438.

- Shin, W. S., Oh, S., An, S. W., Park, G. M., Kwon, D., Ham, J., ... & Park, B. G. (2013). 5E-and 5Z-farnesylacetones from *Sargassum siliquastrum* as novel selective L-type calcium channel blockers. *Vascular Pharmacology*, 58(4), 299-306.
- Shitole, S. S., Balange, A. K., & Gangan, S. S. (2014). Use of seaweed (*Sargassum tenerrimum*) extract as gel enhancer for lesser sardine (*Sardinella brachiosoma*) surimi. *International Aquatic Research*, 6, 1-11.
- Shobharani, P., Nanishankar, V. H., Halami, P. M., & Sachindra, N. M. (2014). Antioxidant and anticoagulant activity of polyphenol and polysaccharides from fermented *Sargassum* sp. *International journal of biological macromolecules*, 65, 542-548.
- Silva, V. A. J., Andrade, P. L., Silva, M. P. C., Valladares, L. D. L. S., & Aguiar, J. A. (2013). Synthesis and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles coated with fucan polysaccharides. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 343, 138-143.
- Sissini, M. N., de Barros Barreto, M. B. B., Széchy, M. T. M., De Lucena, M. B., Oliveira, M. C., Gower, J., ... & Horta, P. A. (2017). The floating *Sargassum* (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean—likely scenarios. *Phycologia*, 56(3), 321-328.
- Snehya, A. V., Sundaramahalingam, M. A., Rajeshbanu, J., & Sivashanmugam, P. (2022). Studies on evaluation of pretreatment efficiency of surfactant mediated ultrasonic pretreatment of *Sargassum tennerimum* (marine macroalgae) for achieving profitable biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(39), 17184-17193.
- Sobuj, M. K. A., Shemul, M. S., Islam, M. S., Islam, M. A., Mely, S. S., Ayon, M. H., ... & Rafiquzzaman, S. M. (2024). Qualitative and quantitative phytochemical analysis of brown seaweed *Sargassum polycystum* collected from Bangladesh with its antioxidant activity determination. *Food Chemistry Advances*, 4, 100565.
- Song, G., Guo, Y., Li, G., Zhao, W., & Yu, Y. (2019). Comparison for adsorption of tetracycline and cefradine using biochar derived from seaweed *Sargassum* sp. *Desalination and Water Treatment*, 160, 316-324.
- Soto, M., Vazquez, M. A., de Vega, A., Vilarino, J. M., Fernandez, G., & de Vicente, M. E. S. (2015). Methane potential and anaerobic treatment feasibility of *Sargassum muticum*. *Bioresource technology*, 189, 53-61.
- Speede, R., Alleyne, K., & Cox, S. A. L. (2024). *Innovations for Sargassum resilience*.

- Stæhr, P. A., Pedersen, M. F., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Krause-Jensen, D. (2000). Invasion of *Sargassum muticum* in Limfjorden (Denmark) and its possible impact on the indigenous macroalgal community. *Marine ecology progress series*, 207, 79-88.
- Stengel, D. B., & Connan, S. (2015). Marine algae: *A source of biomass for biotechnological applications*. In *Natural products from marine algae* (pp. 1-37). Humana Press, New York, NY.
- Stephan, P., Gaspard, S., Dulormne, M., Francoeur, M., Melyon, S., Hartmeyer, P., ... & Delannoy, M. (2024). Antillean contaminated soils amendment with microwave prepared sargassum biochar: A promising solution to reduce chlordecone transfer to laying hens and piglets?. *Chemosphere*, 359, 142282.
- S'thandiwe, N. M., Olofinsan, K. A., Mohamed, A. I., Meriga, B., & Islam, M. S. (2024). Bioactivities of *Sargassum elegans*, *Bryopsis myosuroides*, *Callophyllis variegata* seaweeds on diabetes and obesity-related biochemical parameters: A comparative in vitro study. *Fitoterapia*, 179, 106252.
- Stiger-Pouvreau, V., Mattio, L., De Ramon N'Yeurt, A., Uwai, S., Dominguez, H., Flórez-Fernández, N., ... & Critchley, A. T. (2023). A concise review of the highly diverse genus *Sargassum* C. Agardh with wide industrial potential. *Journal of Applied Phycology*, 35(4), 1453-1483.
- Subakir, F. N. M., Ishak, N. I., Samah, N. A., Aziz, K. A. A., & Zaharudin, N. (2021). The effects of seaweed-based pellet binders on growth performance, feed efficiency and carcass characteristics in broilers. *Animal Feed Science and Technology*, 272, 114786.
- Sun, Y., Li, H., Ma, X., Pu, M., Zhang, Y., Dong, Z., ... & Zheng, S. (2024). Purification and Screening of the Antialgal Activity of Seaweed Extracts and a New Glycolipid Derivative against Two Ichthyotoxic Red Tide Microalgae *Amphidinium carterae* and *Karenia mikimotoi*. *Marine Drugs*, 22(6), 279.
- Sunwoo, I., Kim, Y., Kim, J., Cho, H., & Jeong, G. T. (2023). Optimization, Scale-Up, and Economic Analysis of the Ethanol Production Process Using *Sargassum horneri*. *Fermentation*, 9(12), 1004.
- Surabhi, G., Dhara, S., Maneesh, A., Chakraborty, K., Valluru, L., & Chenchula, S. R. (2021). Polygalactofucopyranose from marine alga as a prospective antihypertensive lead. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 589-599.
- Susano, P., Silva, J., Alves, C., Martins, A., Pinteus, S., Gaspar, H., ... & Pedrosa, R. (2022). Mitigating the negative impacts of marine invasive species—*Sargassum muticum*—a key seaweed for skincare products development. *Algal Research*, 62, 102634.

- Tabaraki, R., & Heidarizadi, E. (2018). Simultaneous biosorption of Arsenic (III) and Arsenic (V): Application of multiple response optimizations. *Ecotoxicology and environmental safety*, 166, 35-41.
- Tabaraki, R., & Nateghi, A. (2016). Application of taguchi L16 orthogonal array design to optimize hydrazine biosorption by *Sargassum ilicifolium*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(5), 1450-1457.
- Tahiluddin, A., Irm, S. S., Jumadil, K., Muddihil, R., & Terzi, E. (2022). Use of brown seaweed extracts as bio-fertilizers and their effects on the carrageenan yield, ice-ice disease occurrence, and growth rate of the red seaweed *Kappaphycus striatus*. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 436-447.
- Tanniou, A., Vandanjon, L., Incera, M., Serrano Leon, E., Husa, V., Le Grand, J., ... & Stiger-Pouvreau, V. (2014). Assessment of the spatial variability of phenolic contents and associated bioactivities in the invasive alga *Sargassum muticum* sampled along its European range from Norway to Portugal. *Journal of Applied Phycology*, 26, 1215-1230.
- Thalib, B., Hamrun, N., Utama, M. D., Machmud, E., Arpa, S., Hasyim, R., & Thalib, A. M. (2020). The analysis of accelerator concentration effect on setting time and morphology surface impression materials made of brown algae *Sargassum* sp. *Medicina Clinica Practica*, 3, 100105.
- Thanigaivel, S., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A., & Thomas, J. (2019). Protective efficacy of microencapsulated seaweed extracts for preventing *Aeromonas* infections in *Oreochromis mossambicus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 218, 36-45.
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2020). Efficiency of hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of pelagic *Sargassum* for biogas and fertiliser recovery. *Fuel*, 279, 118527.
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2020). Pelagic *Sargassum* for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109564.
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic *Sargassum* utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035.

- Thuy, T. T. T., Ly, B. M., Van, T. T. T., Van Quang, N., Tu, H. C., Zheng, Y., ... & Ai, U. (2015). Anti-HIV activity of fucoidans from three brown seaweed species. *Carbohydrate polymers*, *115*, 122-128.
- Tian, H., Liu, H., Song, W., Zhu, L., Zhang, T., Li, R., & Yin, X. (2020). Structure, antioxidant and immunostimulatory activities of the polysaccharides from *Sargassum carpophyllum*. *Algal Research*, *49*, 101853.
- Tipbunjong, C., Hengpratom, T., Peerakietkhajorn, S., & Mayakun, J. (2024). Toxicological Evaluation of *Sargassum polycystum* in Mice with Loperamide-Induced Constipation. *Sains Malaysiana*, *53*(10), 3355-3367.
- Trejo-Caballero, M. E., Elizalde-Mata, A., Guardado-Ruiz, E., Molina, G. A., Miranda, J., & Estevez, M. (2024). Sustainable synthesis and characterization of novel polymeric biohydrogel/sargassum-derived nanocellulose composites for the removal of emerging contaminants. *MRS Advances*, *10*(1), 36-42.
- Tsou, M. H., Wu, Z. Y., Chen, G. W., Lee, C. C., Lee, Z. H., Yuan, W. T., ... & Lin, H. M. (2023). Diatom-derived mesoporous silica nanoparticles loaded with fucoidan for enhanced chemo-photodynamic therapy. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*, 127078.
- Tu, C., Yu, T., Feng, S., Xu, N., Massawe, A., Shui, S., & Zhang, B. (2024). Dynamics of microbial communities, flavor, and physicochemical properties of kombucha-fermented *Sargassum fusiforme* beverage during fermentation. *Lwt*, *192*, 115729.
- Tun Norbrillinda, M., Mahanom, H., Nur Elyana, N., & Nur Intan Farina, S. (2016). Optimization of spray drying process of *Sargassum muticum* color extract. *Drying Technology*, *34*(14), 1735-1744.
- Ungureanu, G., Santos, S. C., Volf, I., Boaventura, R. A., & Botelho, C. M. (2017). Biosorption of antimony oxyanions by brown seaweeds: Batch and column studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(4), 3463-3471.
- Van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., ... & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine pollution bulletin*, *122*(1-2), 272-281.

- Vanbrabant, K., Van Meel, D., Kerksiek, A., Friedrichs, S., Dubbeldam, M., Schepers, M., ... & Lütjohann, D. (2021). 24 (R, S)-Saringosterol-From artefact to a biological medical agent. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 212, 105942.
- Vardizadeh, F., Babaei, S., Naseri, M., & Golmakani, M. T. (2021). Effect of marine sulfated polysaccharides derived from Persian Gulf seaweeds on *Oncorhynchus mykiss* oil stability under accelerated storage conditions. *Algal Research*, 60, 102553.
- Vasquez, R. D., Apostol, J. G., de Leon, J. D., Mariano, J. D., Mirhan, C. M. C., Pangan, S. S., ... & Zamora, E. T. (2016). Polysaccharide-mediated green synthesis of silver nanoparticles from *Sargassum siliquosum* JG Agardh: Assessment of toxicity and hepatoprotective activity. *OpenNano*, 1, 16-24.
- Venkatesan, J., Lowe, B., Anil, S., Manivasagan, P., Kheraif, A. A. A., Kang, K. H., & Kim, S. K. (2015). Seaweed polysaccharides and their potential biomedical applications. *Starch-Stärke*, 67(5-6), 381-390.
- Veeragoni, D., Deshpande, S. S., Singh, V., Misra, S., & Mutheneni, S. R. (2023). In vitro and in vivo antimalarial activity of green synthesized silver nanoparticles using *Sargassum tenerrimum*-a marine seaweed. *Acta Tropica*, 245, 106982.
- Vijayanand, N., Ramya, S. S., & Rathinavel, S. (2014). Potential of liquid extracts of *Sargassum wightii* on growth, biochemical and yield parameters of cluster bean plant. *Asian pacific journal of Reproduction*, 3(2), 150-155.
- Vijayaraghavan, G., & Shanthakumar, S. (2015). Removal of sulphur black dye from its aqueous solution using alginate from *Sargassum* sp.(Brown algae) as a coagulant. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(5), 1427-1434.
- Vinodkumar, M., & Packirisamy, A. S. B. (2023). Effective isolation of brown seaweed flavonoids with their potential to inhibit free radicals and proliferative cells. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 33(12), 3794-3804.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83-87.
- Wang, S., Xu, X., Sun, C., Zhang, J., He, X., Zhang, Z., ... & Mao, G. (2021). Sulphated glucuronomannan tetramer and hexamer from *Sargassum thunbergii* exhibit anti-human cytomegalovirus activity by blocking viral entry. *Carbohydrate Polymers*, 273, 118510.

- Wei, B., Zhong, Q. W., Ke, S. Z., Zhou, T. S., Xu, Q. L., Wang, S. J., ... & Wang, H. (2020). Sargassum fusiforme polysaccharides prevent high-fat diet-induced early fasting hypoglycemia and regulate the gut microbiota composition. *Marine Drugs*, 18(9), 444.
- Wei, J., Mou, C., Bao, Y., Xie, Y., Jin, H., Shen, H., ... & Cui, W. (2021). Fucoxanthin alleviates methamphetamine-induced neurotoxicity possibly via the inhibition of interaction between Keap1 and Nrf2. *Journal of Functional Foods*, 86, 104713.
- Weitkamp, J. T., El Hajjami, S., Acil, Y., Spille, J., Sayin, S., Okudan, E. S., ... & Gülses, A. (2024). Antibacterial properties of marine algae incorporated polylactide acid membranes as an alternative to clinically applied different collagen membranes. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 35(1), 9.
- Wen, Z. S., Xiang, X. W., Jin, H. X., Guo, X. Y., Liu, L. J., Huang, Y. N., ... & Qu, Y. L. (2016). Composition and anti-inflammatory effect of polysaccharides from *Sargassum horneri* in RAW264.7 macrophages. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 403-413.
- Widyaningrum, T. (2016). Production of bioethanol from the hydrolysate of brown seaweed (*Sargassum crassifolium*) using a naturally β -glucosidase producing yeast *Saccharomyces cereviceae* JCM 3012. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(3), 1333-1340.
- Wu, G., Bao, H., Xia, Z., Yang, B., Lei, L., Li, Z., & Liu, C. (2018). Polypyrrole/sargassum activated carbon modified stainless-steel sponge as high-performance and low-cost bioanode for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 384, 86-92.
- Wu, Y., Gao, H., Wang, Y., Peng, Z., Guo, Z., Ma, Y., ... & Zhong, Q. (2022). Effects of different extraction methods on contents, profiles, and antioxidant abilities of free and bound phenolics of *Sargassum polycystum* from the South China Sea. *Journal of Food Science*, 87(3), 968-981.
- Wu, Z., Tong, C., Zhang, J., Sun, J., Jiang, H., Duan, M., ... & Pang, J. (2021). Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of konjac glucomannan/cellulose nanocrystal bionanocomposite films incorporated with phlorotannin from *Sargassum*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 323-330.
- Xin, Y. K., Navaneetharajah, D., Amat, N., Zulkifli, N., Hui, N. C., Said, S. M., & Tang, S. G. H. (2023). Physical Characterization of Green Synthesized Silver Nanoparticles Using Brown Seaweed *Sargassum Binderi*. *Malaysian Journal of Microscopy*, 19(1), 259-270.

- Xing, Q., Han, S., Park, J. S., Yarish, C., & Kim, J. K. (2023). Comparative transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of heat-tolerance in *Neopyropia yezoensis* induced by *Sargassum horneri* extract. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1142483.
- Xiu, L., Zhong, G., Liu, D., Chen, S., Liu, H., & Chen, F. (2017). Comparative efficacy and toxicity of different species of *Sargassum* in Haizao Yuhu decoction in PTU-induced goiter rats. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2017*(1), 3526186.
- Xu, B. T., Jin, D. Z., Yu, Y., Zhang, Q., Weng, W. J., Ren, K. X., & Tai, Y. L. (2024). Nanoclay-reinforced alginate aerogels: Preparation and properties. *RSC advances*, *14*(2), 954-962.
- Yang, J., Kim, H. J., Herath, K. H. I. N. M., & Jee, Y. (2024). Cellulase enzyme-assisted extraction of *Sargassum horneri* enhances the immunomodulation by regulating TLR4/MyD88/NF- κ B pathway in murine splenocytes with or without Concanavalin A. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *181*, 117673.
- Yao, W., Liu, M., Chen, X., You, L., Ma, Y., & Hileuskaya, K. (2022). Effects of UV/H₂O₂ degradation and step gradient ethanol precipitation on *Sargassum fusiforme* polysaccharides: Physicochemical characterization and protective effects against intestinal epithelial injury. *Food Research International*, *155*, 111093.
- Yao, W., Yong, J., Lv, B., Guo, S., You, L., Cheung, P. C. K., & Kulikouskaya, V. I. (2023). Enhanced in vitro anti-photoaging effect of degraded seaweed polysaccharides by UV/H₂O₂ treatment. *Marine Drugs*, *21*(8), 430.
- Yashaswini, G. V., Nagendra, A. H., Shenoy, S., Chatterjee, K., & Venkatesan, J. (2022). Isolation and purification of fucoidan from *Sargassum ilicifolium*: Osteogenic differentiation potential in mesenchymal stem cells for bone tissue engineering. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *136*, 104418.
- Yu, Z., Zhu, X., Jiang, Y., Luo, P., & Hu, C. (2014). Bioremediation and fodder potentials of two *Sargassum* spp. in coastal waters of Shenzhen, South China. *Marine Pollution Bulletin*, *85*(2), 797-802.
- Yuan, D., Meng, H., Huang, Q., Li, C., & Fu, X. (2021). Preparation and characterization of chitosan-based edible active films incorporated with *Sargassum pallidum* polysaccharides by ultrasound treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, *183*, 473-480.

- Yuhendra, A. P., Farghali, M., Mohamed, I. M., Iwasaki, M., Tangtaweewipat, S., Ihara, I., ... & Umetsu, K. (2021). Potential of biogas production from the anaerobic digestion of *Sargassum fulvellum* macroalgae: Influences of mechanical, chemical, and biological pretreatments. *Biochemical Engineering Journal*, *175*, 108140.
- Zaharudin, N., Salmeán, A. A., & Dragsted, L. O. (2018). Inhibitory effects of edible seaweeds, polyphenolics and alginates on the activities of porcine pancreatic α -amylase. *Food Chemistry*, *245*, 1196-1203.
- Zeng, G., Lou, S., Ying, H., Wu, X., Dou, X., Ai, N., & Wang, J. (2018). Preparation of microporous carbon from *Sargassum horneri* by hydrothermal carbonization and KOH activation for CO₂ capture. *Journal of Chemistry*, *2018*(1), 4319149.
- Zhang, B., Yu, G., Li, J., Liu, Y., Zhou, Y., Li, Y., ... & Jiang, Y. (2020). Optimization of extraction technology of poly-mannuronic acid to a green delivery system for the water-insoluble pesticide, λ -Cyhalothrin. *International Journal of Biological Macromolecules*, *153*, 17-25.
- Zhang, J., Wang, S., Yang, M., Ding, J., Huang, Y., Zhu, Y., ... & Yan, B. (2024). Antiviral activity of a polysaccharide from *Sargassum fusiforme* against respiratory syncytial virus. *International Journal of Biological Macromolecules*, *279*, 135267.
- Zhou, M., Yin, J., Zhao, X., Fu, Y., Jin, X., Liu, X., & Jiao, T. (2020). Green synthesis of gold nanoparticles using *Sargassum carpophyllum* extract and its application in visual detection of melamine. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *603*, 125293.
- Zhuang, S. J., Xu, H. K., Hu, X., Wu, T. C., Li, J. N., Lee, H. G., ... & Jeon, Y. J. (2024). In vitro and in vivo anti-inflammatory properties of an active fucoidan fraction from *Sargassum fusiforme* and a fraction-based hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, *265*, 130866.

CAPÍTULO 3. Hacia el aprovechamiento sostenible de *Sargassum liebmannii* (Sargassaceae) en Costa Rica: caracterización fisicoquímica y evaluación de crecimiento

En formato de artículo científico para publicación en la Revista de Biología Tropical

Caracterización fisicoquímica y evaluación de crecimiento de *Sargassum liebmannii* (Sargassaceae) perspectivas para un uso sostenible.

Mariana Viales Cubillo^{1,3};
Alejandro H. Buschmann⁴;
German Madrigal Redondo⁵;
Cindy Fernández-García^{1,2};

1 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica.

2 Escuela de Biología Universidad de Costa Rica.

3 Posgrado de Biología Universidad de Costa Rica.

4 Centro i-mar y CeBiB, Universidad de Los Lagos

5 Facultad de Farmacia, Instituto de Investigaciones Farmacéuticas, Universidad de Costa Rica.

ABSTRACT

Introduction: *Sargassum* is a genus of brown macroalgae widely distributed in tropical and subtropical regions, characterized by high morphological diversity and the production of bioactive metabolites of biotechnological interest. In the northern Pacific of Costa Rica, *Sargassum liebmannii* is a dominant species in ecosystems influenced by cold-water upwelling, with potential applications in food, cosmetics, pharmaceuticals, and materials. However, there are few studies on its physicochemical characterization and cultivation requirements. **Objective:** To physicochemically characterize *S. liebmannii* and evaluate its *ex situ* growth under two temperature conditions, in order to establish a baseline for its sustainable utilization. **Methods:** Thalli of *S. liebmannii* were collected along the coast of Cuajiniquil, Guanacaste (May–June 2024–2025). Physicochemical parameters (pH, conductivity, osmolarity, density), total carbohydrate and protein content, and phytochemical profile were determined through qualitative assays. *Ex situ* growth was evaluated at two temperature ranges (19–20 °C and 24–25 °C) over a period of 10 weeks, with fresh weight recorded weekly. **Results:** The aqueous extract exhibited a neutral pH (7.11), high conductivity (17.9 mS/cm), osmolarity of 315 mOsm/kg, and density of 1.0096 g/mL. Total soluble carbohydrates reached 28.4% and proteins 15% of dry weight. The phytochemical analysis detected flavonoids, phenols, tannins, carotenoids, terpenes, steroids, saponins, and cardiotonic glycosides, with potential antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and photoprotective properties. *Ex situ* growth was more stable at 19–20 °C, while sustained biomass loss was observed at 24–25 °C. **Conclusions:** *S. liebmannii* presents a physicochemical profile comparable to other *Sargassum* species of biotechnological interest, and its growth is temperature-sensitive, performing better at lower ranges. These results provide a baseline for future studies to optimize cultivation protocols and promote its valorization within Costa Rica's blue economy.

Key words: Physicochemical characterization, *Ex situ* cultivation, Temperature tolerance, Bioactive compounds

RESUMEN

Introducción: *Sargassum* es un género de macroalgas pardas de amplia distribución en regiones tropicales y subtropicales, caracterizado por su elevada diversidad morfológica y su producción de metabolitos bioactivos de interés biotecnológico. En el Pacífico norte de Costa

Rica, *Sargassum liebmannii* es una especie dominante en ecosistemas influenciados por afloramientos fríos, con potencial para aplicaciones en alimentación, cosmética, farmacéutica y materiales. Sin embargo, existen pocos estudios sobre su caracterización fisicoquímica y sus requerimientos de cultivo. **Objetivo:** Caracterizar fisicoquímicamente a *S. liebmannii* y evaluar su crecimiento *ex situ* bajo dos condiciones de temperatura, con el fin de establecer una línea base para su aprovechamiento sostenible. **Métodos:** Se recolectaron talos de *S. liebmannii* en la costa de Cuajiniquil, Guanacaste (Mayo-junio 2024-2025). Se determinaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, osmolaridad, densidad), contenido de carbohidratos y proteínas totales, y perfil fitoquímico mediante pruebas cualitativas. El crecimiento *ex situ* se evaluó a dos rangos de temperatura (19–20 °C y 24–25 °C) durante 10 semanas, registrando el peso fresco semanalmente. **Resultados:** El extracto acuoso presentó pH neutro (7.11), alta conductividad (17.9 mS/cm), osmolaridad de 315 mOsm/kg y densidad de 1.0096 g/mL. Los carbohidratos solubles totales alcanzaron el 28.4 % y las proteínas el 15 % del peso seco. El análisis fitoquímico detectó flavonoides, fenoles, taninos, carotenoides, terpenos, esteroides, saponinas y glicósidos cardiotónicos, con potencial antioxidante, antiinflamatorio, antimicrobiano y fotoprotector. El crecimiento *ex situ* fue más estable a 19–20 °C, mientras que a 24–25 °C se observó pérdida sostenida de biomasa. **Conclusiones:** *S. liebmannii* presenta un perfil fisicoquímico comparable al de otras especies del género con interés biotecnológico, y su crecimiento es sensible a la temperatura, favoreciéndose en rangos más bajos. Estos resultados constituyen una línea base para futuros estudios que optimicen protocolos de cultivo y valoricen su uso dentro de la economía azul de Costa Rica.

Palabras clave: Caracterización fisicoquímica, Cultivo *ex situ*, Tolerancia a la temperatura, Compuestos bioactivos

Total de palabras: 4307

INTRODUCCIÓN

El Pacífico Este Tropical (PET) es una región altamente dinámica y ecológicamente diversa, caracterizada por condiciones oceanográficas complejas como afloramientos costeros, eventos ENSO, fluctuaciones de salinidad, pH y temperatura, que generan entornos costeros variables y a menudo extremos (Lavín et al., 2006; Fiedler & Lavín, 2016; Alvarado et al., 2018). Estas condiciones han favorecido el establecimiento de comunidades de macroalgas altamente adaptadas, entre las que destaca el género *Sargassum* (Fernández-García et al., 2021; Cortés et al., 2014). Además de su rol ecológico como especie fundacional —proporcionando hábitat, alimento, protección y contribuyendo a los ciclos biogeoquímicos— (Aburto-Oropeza et al., 2007; Alvarado et al., 2011), *Sargassum* representa una oportunidad clave para el desarrollo sostenible en la región. Algunas especies del PET han demostrado un notable potencial para aplicaciones en biorremediación y producción de compuestos bioactivos (Villegas-Silva et al., 2022; Tapia-Matinez et al., 2019;

Patrón-Prado et al., 2011). Así, el estudio de las especies locales de *Sargassum* se vuelve prioritario no solo para comprender sus funciones ecológicas, sino también para evaluar su aprovechamiento responsable y adaptado al contexto regional.

Aunque la mayoría de los géneros de algas pardas alcanza grandes tamaños principalmente en zonas templadas, donde las condiciones favorecen un crecimiento más robusto (Hadiyanto et al., 2025), en diversas regiones del Pacífico Este Tropical se han reportado bosques abundantes de *Sargassum* que pueden alcanzar hasta un metro de altura. Estas formaciones han sido documentadas en el Pacífico norte de Costa Rica (Cortés et al., 2014; Fernández-García et al., 2021), en el sur de Nicaragua y el Archipiélago de Las Perlas en Panamá (Base de datos de algas del CIMAR-UCR), así como en el Pacífico tropical mexicano (Jung-King et al., 2021).

En el Pacífico norte de Costa Rica, la presencia de un afloramiento costero estacional (diciembre a abril), que disminuye la temperatura del agua hasta los 18–19 °C y aumenta la disponibilidad de nutrientes, crea condiciones favorables para el desarrollo de extensas praderas de *Sargassum* sobre sustratos rocosos (Alvarado et al., 2011). Estas praderas están compuestas por dos especies: *Sargassum liebmannii* y *Sargassum lacrucense*, aunque la primera es más abundante en la mayoría de los sitios, las dos especies se encuentran distribuidas de forma alterna en los parches, y presentan periodos de crecimiento y reproducción similares (Viales-Cubillo et al., 2025).

Aunque este género de macroalgas pardas ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial en aplicaciones que van desde la industria alimentaria y medicofarmacéutica (Khorami et al., 2024; Polo & Chow, 2022; Sengkhim et al., 2021; Vanavil et al., 2020), hasta la producción de biomateriales y fertilizantes en regiones templadas y tropicales (Stanislas et al., 2024; Doh et al., 2020; Uribe-Orozco et al., 2018). En Costa Rica, a pesar del creciente interés por aprovechar este recurso natural, aún no se ha desarrollado una industria que permita su uso sostenible. Iniciativas como esta, orientadas al aprovechamiento responsable de macroalgas, se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 12 (producción y consumo responsables) y el ODS 14 (vida

submarina), y podrían ofrecer beneficios socioeconómicos para las comunidades costeras al diversificar sus fuentes de ingreso (Organización Naciones Unidas, 2018).

Hasta la fecha, el único estudio orientado al potencial uso de especies del género *Sargassum* en el país se ha realizado en la costa Caribe (Rodríguez-Quesada et al., 2024), y se centró en la fabricación de hidrogeles de nanocelulosa como un mecanismo para la liberación controlada de nutrientes en sistemas de germinación. Sin embargo, dado que la composición y las propiedades de las algas pueden variar significativamente según la especie y las condiciones ambientales, es fundamental caracterizar localmente estas especies antes de proponer aplicaciones concretas (Yeong & Wong, 2013; Smith, 2004).

Por ello, para avanzar en el aprovechamiento sostenible de especies abundantes como *Sargassum liebmannii*, es fundamental estudiar tres aspectos clave: su composición fisicoquímica, su ciclo reproductivo y su crecimiento. La caracterización fisicoquímica permite identificar compuestos bioactivos y propiedades funcionales que determinan su aplicabilidad en diversos sectores (Baleta et al., 2017). Por otro lado, conocer su ciclo reproductivo y patrones de crecimiento es esencial para establecer periodos óptimos de cosecha, evitando la recolección en etapas críticas para la regeneración de las poblaciones (Mac Monagail et al., 2017). Finalmente, evaluar el crecimiento en condiciones controladas permite conocer los requerimientos ecológicos para su cultivo y establecer parámetros para su producción ex situ (Vidaurre-Castillo et al., 2023).

Es por esto que este estudio se enfoca en la especie más representativa de los bosques de *Sargassum* del Pacífico norte de Costa Rica, *Sargassum liebmannii*. Su objetivo principal es dar los primeros pasos hacia el uso sostenible de este recurso mediante una caracterización fisicoquímica —incluyendo pruebas fitoquímicas, contenido de proteínas, lípidos, dureza y densidad—, así como el monitoreo de su ciclo reproductivo y la evaluación de su crecimiento ex situ. Con ello, se espera no solo avanzar en el uso sostenible de esta alga, sino también establecer un modelo que pueda aplicarse a otras especies presentes en Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sito de estudio: El sitio de estudio fue desde Bahía Culebra (10°35'N 85°40'W) hasta el límite con Nicaragua (11°05'N 85°38'W). Esta área presenta un periodo de disminución de lluvias marcado entre diciembre y marzo, además cuenta con dos periodos de altas

precipitaciones uno de mayo a junio y otro de agosto a setiembre (Lizano & Alfaro, 2014). Adicionalmente, en esta región se presenta una estacionalidad bastante marcada ya que se da un afloramiento costero en la época de menor precipitación (diciembre-marzo), en el cual las temperaturas de agua puede descender hasta los 17 °C (Alfaro & Cortés, 2012) y hay un aumento la concentración de nutrientes en la columna de agua que puede llegar hasta 15.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de nitrato y 1.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de fosfato (Fernández-García et al., 2012), lo cual permite el incremento de su abundancia de los talos de *Sargassum* en zonas costeras (Alvarado et al., 2018).

Recolección y procesamiento del material:

a. Biomasa a recolectar

Las muestras podían estar compuestas por varios individuos o por fragmentos de individuos de gran tamaño (hasta 60 cm de largo). Se recolectaron únicamente talos maduros de *Sargassum liebmannii* con estructuras reproductivas visibles en diferentes localidades del Pacífico norte de Costa Rica, principalmente en tres sitios: Playa Rajadita (11°01'32"N 85°45'04"W), Playa Piedras (11°01'26"N 85°45'13"W) e Isla Muñecos (10°58'52"N 85°42'53"W). En cada sitio se realizaron de dos a tres muestreos entre mayo y junio de 2024 y 2025, coincidiendo con la temporada en la que las poblaciones presentan alta biomasa y actividad reproductiva, lo que facilita la obtención de material maduro y minimiza la variabilidad asociada a cambios estacionales. Se recolectaron talos completos que podían alcanzar un peso fresco entre 2,5 y 4,0 kg, procurando que estuvieran limpios y presentaran la menor cantidad posible de epífitos, sedimentos u organismos asociados. La recolección se llevó a cabo mediante buceo libre con esnórquel, buceo autónomo (SCUBA) o de forma manual, dependiendo de la profundidad a la que se encontraban los talos.

b. Almacenamiento y transporte

Las muestras fueron lavadas con agua de mar y almacenadas con su respectiva etiqueta en bolsas plásticas resellables, para luego ser transportadas en hieleras hasta el laboratorio. Las muestras destinadas a los experimentos de crecimiento

fueron trasladadas en bandejas con papel humedecido con agua de mar, dentro de hieleras equipadas con un aireador portátil. Se procuró que todos los talos recolectados tuvieran su estructura de fijación (sujetador) intacta, con el fin de facilitar su establecimiento en las condiciones de cultivo.

c. Procesamiento del material

Con respecto a las pruebas químicas, las muestras fueron limpiadas mediante dos o tres lavados con agua destilada para eliminar epífitos y restos de arena. Posteriormente, se eliminó el exceso de agua y el material fue almacenado en un congelador hasta su procesamiento. Para los talos que se utilizaron en los experimentos de crecimiento, se empleó una brocha para eliminar cuidadosamente epibiontes y algunos animales visibles a simple vista, y luego se realizaron tres lavados (1-2 minutos cada uno) consecutivos con agua destilada para limpiar las algas. Finalmente, se procedió a llevarlas a su fase de aclimatación (ver sección Pruebas de crecimiento ex situ).

Pruebas fisicoquímicas:

a. Realización de los extractos

Los extractos fueron preparados a partir de las muestras que se procesaron al llegar al laboratorio luego de cada gira de colecta. Primero, cada muestra fue liofilizada para conservar su composición química hasta el momento del análisis. Para este procedimiento, las muestras se mantuvieron congeladas a -80°C y, a esta temperatura, se introdujeron en la cámara de sublimación. Una vez obtenidas las muestras liofilizadas, se procedió a molerlas utilizando un procesador de alimentos y luego se pasaron por un colador con el fin de obtener un grano fino y homogéneo.

El material molido se colocó en diferentes disolventes para preparar varios tipos de extractos, considerando que cada disolvente presenta distinta afinidad por los compuestos químicos presentes en el alga. Se utilizaron cuatro tipos de disolventes: agua, etanol, hexano y metanol, empleando una proporción de 1:10 (peso/volumen) en cada caso. Los extractos se elaboraron colocando el material vegetal dentro de

filtros de tela, a través de los cuales se hizo pasar todo el volumen del disolvente correspondiente.

b. Realización de las pruebas fisicoquímicas

Inicialmente, se caracterizó el pH, la densidad, la conductividad y la osmolaridad de los extractos acuoso. También se cuantificó el contenido total de carbohidratos solubles mediante el método de DuBois (DuBois et al., 1956) y proteínas mediante el método de Lowry (Lowry et al., 1951) presentes en las muestras. Posteriormente, se realizó un panel de pruebas fitoquímicas (Cuadro 1) para cada muestra utilizando cuatro tipos de extractos: acuoso, etanólico, hexánico y metanólico. Las pruebas se ejecutaron con dos réplicas por extracto (2–3 ml de extracto cada una) y un control, para un total de tres tubos por muestra por extracto, es decir, 12 tubos en total para cada prueba. Las reacciones obtenidas se clasificaron de acuerdo con la intensidad del color o la cantidad de precipitado como: reacción ausente (–), escasa (+), moderada (++) o abundante (+++).

Cuadro. 1. Pruebas de pruebas fitoquímicas por realizar en los especímenes de *Sargassum liebmannii* colectados en el Pacífico Norte de Costa Rica.

Prueba	Cita	Compuesto	Reacción
Dragendorff	Tiwari et al., 2013	Alcaloides	Formación de precipitado o turbidez
Mayer	Jha et al., 2012	Alcaloides	Precipitado blanco cremoso
Wagner	Jha et al., 2012	Alcaloides	Precipitado rojo-café
Tollens	Tiwari et al., 2013	Carbohidratos	Formación espejo en las paredes
Molish	Joshi et al., 2013	Carbohidratos	Formación producto púrpura
Fehling	Tiwari et al., 2013	Carbohidratos reductores	Precipitado rojo-café
Benedict	Tiwari et al., 2013	Carbohidratos reductores	Precipitado rojo-café
Shinoda	Tiwari et al., 2013	Flavonoides	Coloración rosada
Pews	Joshi et al., 2013	Flavonoides	Coloración purpura roja
Molibdato de Amonio	Aldana-Mejía, 2010	Terpenos	Coloración azul

IV			
Sudan	Tiwari et al., 2013	Grasas	Disco rojo oscuro
Kedde	Adedapo et al., 2013	Glicósidos Cardiotónicos	Color café morado
Guignard	Tiwari et al., 2013	Glicósidos Cianogénicos	Color rojo purpura
Rosenthaler	Bhaskar, 2018	Saponinas	Color violeta
Espuma	Aldana-Mejía, 2010	Saponinas	Aparición de espuma mayor
Bornträger-Kraus	Carvajal-Rojas et al., 2009	Quinonas	Coloración rosado-rojo intenso
Salkowski	Aldana-Mejía, 2010	Terpenos. Esteroides	Color amarillo o rojo
Gelatina-Sal	Joshi et al., 2013	Taninos	Formación de precipitado blanco
FeCl ₃	Aldana-Mejía, 2010	Flavonoides y Fenoles	Color verde intenso
Lieberman-Burchard	Aldana-Mejía, 2010	Esteroides	Color rosa violeta/ azul verde
Rosenheim	Ríos et al., 2014 Aldana-Mejía, 2010	Antocianinas Lactonas y	Coloración roja-marrón Color naranja-rojo oscuro
Baljet		cumarinas	
Hidroximato férrico	Carvajal-Rojas et al., 2009	Lactonas sesquiterpénicas	Color rojo ladrillo
Ninhidrina	Tiwari et al., 2013	Proteínas	Color violáceo o amarillo
Enfriamiento HCl-	Tiwari et al., 2013	Mucílago	Apariencia gelatinosa
Formaldehido	Tiwari et al., 2013	Taninos condensados	Precipitado o cambio de color rojizo
Carr-Price	Tiwari et al., 2013	Carotenoides	Color verde azulado

Pruebas de crecimiento *ex situ*

a. Fase de aclimatación

Durante la fase de aclimatación, se seleccionaron talos de *Sargassum liebmannii* de entre 10 y 20 cm de largo, los cuales fueron colocados en una pecera (20 gal) con agua de mar esterilizada, mantenida a una temperatura constante entre 24 y 25 °C mediante termostatos, lo cual corresponde a las condiciones promedio del hábitat de la especie. El sistema contó con aireación continua proporcionada por bombas de aire,

y se añadió medio de agua de mar enriquecida con Provasoli (Provasoli, 1968) una vez por semana para garantizar una disponibilidad básica de nutrientes. Además, los talos fueron expuestos a un fotoperiodo controlado de 12 horas de luz blanca y 12 horas de oscuridad. Los organismos se mantuvieron bajo estas condiciones durante un mes, con el objetivo de permitir su adaptación previa al inicio de los experimentos de cultivo.

b. Pruebas de crecimiento frente a temperatura

Para evaluar el efecto de la temperatura sobre el crecimiento de *Sargassum liebmannii*, se realizó un experimento con dos tratamientos: un tratamiento con temperatura baja (19-20 °C), correspondiente a las mínimas reportadas durante la temporada de afloramiento en el Pacífico norte (Cortés et al., 2014), y un tratamiento control con temperatura entre 24 y 25 °C, que representa las condiciones naturales promedio del agua en la zona de estudio.

Se utilizaron talos completos de *S. liebmannii* que midieran entre 7 y 10 cm, los cuales fueron colocados individualmente en peceras (1L) de agua de mar esterilizada enriquecida con medio PES (Provasoli Enriched Seawater). El medio fue renovado semanalmente durante todo el experimento. Cada tratamiento contó con ocho réplicas. La aireación y el movimiento del agua se mantuvieron constantes mediante bombas de aire. Además, los talos fueron expuestos a un fotoperiodo controlado de 12 horas de luz blanca y 12 horas de oscuridad

El experimento tuvo una duración total de diez semanas. Durante este periodo, se midió el peso fresco de cada talo al inicio y posteriormente cada semana, y se tomaron fotografías semanales de todas las réplicas para registrar visualmente los cambios morfológicos. La tasa de crecimiento relativa (RGR) se calculó utilizando la fórmula (1) propuesta por Zou et al. (2017).

$$\text{RGR} = [(\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)] \times 100$$

(1)

Finalmente, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar el efecto de la temperatura sobre el crecimiento, utilizando el programa R a través de la plataforma RStudio (R Core Team, 2020).

RESULTADOS

3.1 Caracterización fisicoquímica general

El extracto acuoso de las muestras de *Sargassum liebmannii* recolectadas presentó un pH de 7.11, una densidad 1.0096 ± 0.0010 g/mL, una osmolaridad de 315 mOsm/kgH₂O y una conductividad de 1.79 μ S/cm en el extracto acuoso. El contenido total de carbohidratos solubles fue de 28.4%, mientras que el contenido de proteínas alcanzó 15%. Estas características proporcionan una línea base sobre la composición química del alga en condiciones naturales.

3.2 Composición fitoquímica

Los extractos de *Sargassum liebmannii* presentaron una variedad de metabolitos secundarios. En general, se detectaron taninos condensados, fenoles como flavonoides, saponinas, lactonas, cumarinas y terpenos, especialmente en los extractos acuosos y metanólicos (Cuadro 2). Las reacciones se clasificaron según la intensidad del color o el precipitado observado en cada prueba, destacando una mayor presencia de compuestos fenólicos en los extractos polares.

Cuadro. 2. Resultados de las pruebas fitoquímicas realizadas con extractos de *Sargassum liebmannii*.

Las reacciones fueron clasificadas según la intensidad del color o precipitado como: ausente (-), escasa (+), moderada (++) , o abundante (+++). Cada prueba se realizó en duplicado, incluyendo un control por extracto.

Prueba	Extracto	Resultado
Carr- Price	Hexánico	-
Carr- Price	Acuoso	-
Carr- Price	Metanólico	+++
Carr- Price	Etanólico	+++
Baljet	Hexánico	-
Baljet	Acuoso	+++
Baljet	Metanólico	-
Baljet	Etanólico	-
Benedict	Hexánico	-
Benedict	Acuoso	-
Benedict	Metanólico	-
Benedict	Etanólico	-
Borntrager- Krauss	Hexánico	-
Borntrager- Krauss	Acuoso	-
Borntrager- Krauss	Metanólico	-
Borntrager- Krauss	Etanólico	-
Cloruro Ferrico	Hexánico	-
Cloruro Ferrico	Acuoso	++
Cloruro Ferrico	Metanólico	-
Cloruro Ferrico	Etanólico	-
Dragendorff	Hexánico	-
Dragendorff	Acuoso	-
Dragendorff	Metanólico	-
Dragendorff	Etanólico	-
Enfriamiento	Hexánico	-
Enfriamiento	Acuoso	-
Enfriamiento	Metanólico	-
Enfriamiento	Etanólico	-
Espuma	Hexánico	-
Espuma	Acuoso	-
Espuma	Metanólico	-
Espuma	Etanólico	-
Fehling	Hexánico	-

Fehling	Acuoso	-
Fehling	Metanólico	-
Fehling	Etanólico	-
Gelatina-Sal	Hexánico	-
Gelatina-Sal	Acuoso	-
Gelatina-Sal	Metanólico	-
Gelatina-Sal	Etanólico	-
Guignard	Hexánico	-
Guignard	Acuoso	-
Guignard	Metanólico	-
Guignard	Etanólico	-
HCL- Formaldehido	Hexánico	-
HCL- Formaldehido	Acuoso	-
HCL- Formaldehido	Metanólico	++
HCL- Formaldehido	Etanólico	++
Hidroxamato Ferrico	Hexánico	-
Hidroxamato Ferrico	Acuoso	-
Hidroxamato Ferrico	Metanólico	-
Hidroxamato Ferrico	Etanólico	-
Kedde	Hexánico	-
Kedde	Acuoso	++
Kedde	Metanólico	-
Kedde	Etanólico	-
Lieberman	Hexánico	-
Lieberman	Acuoso	-
Lieberman	Metanólico	+++
Lieberman	Etanólico	+++
Mayer	Hexánico	-
Mayer	Acuoso	-
Mayer	Metanólico	-
Mayer	Etanólico	-
Molibdato de amonio	Hexánico	-
Molibdato de amonio	Acuoso	-
Molibdato de amonio	Metanólico	+++

Molibdato de amonio	Etanólico	+++
Molish	Hexánico	-
Molish	Acuoso	+++
Molish	Metanólico	+++
Molish	Etanólico	+++
Ninhdrina	Hexánico	-
Ninhdrina	Acuoso	-
Ninhdrina	Metanólico	-
Ninhdrina	Etanólico	-
Pews	Hexánico	-
Pews	Acuoso	-
Pews	Metanólico	-
Pews	Etanólico	-
Rosenheim	Hexánico	-
Rosenheim	Acuoso	-
Rosenheim	Metanólico	-
Rosenheim	Etanólico	-
Rosenthaler	Hexánico	+++
Rosenthaler	Acuoso	+++
Rosenthaler	Metanólico	+++
Rosenthaler	Etanólico	+++
Salkowski	Hexánico	-
Salkowski	Acuoso	+++
Salkowski	Metanólico	+++
Salkowski	Etanólico	+++
Shinoda	Hexánico	-
Shinoda	Acuoso	-
Shinoda	Metanólico	++
Shinoda	Etanólico	++
Sudan	Hexánico	+++
Sudan	Acuoso	+++
Sudan	Metanólico	-
Sudan	Etanólico	-
Tollens	Hexánico	-

Tollens	Acuoso	-
Tollens	Metanólico	+++
Tollens	Etanólico	+++
Wagner	Hexánico	-
Wagner	Acuoso	-
Wagner	Metanólico	-
Wagner	Etanólico	-

3.3 Evaluación del crecimiento *ex situ* bajo diferentes temperaturas

Durante el experimento de cultivo *ex situ*, *Sargassum liebmannii* mostró diferencias significativas en su patrón de crecimiento bajo las dos temperaturas evaluadas (Fig.1). A lo largo de las 10 semanas, los talos mantenidos a 19–20 °C conservaron su biomasa inicial o incluso incrementaron ligeramente su peso fresco. Por el contrario, los talos expuestos a 24–25 °C mostraron una pérdida progresiva de biomasa desde la primera semana, alcanzando valores inferiores a 1 g en promedio al finalizar el experimento.

El análisis visual de los datos (Fig.1) indica una tendencia sostenida de disminución en el tratamiento cálido, mientras que los talos en condiciones más frías mantuvieron un comportamiento más estable. Además, presentaban una mayor integridad estructural y el crecimiento de diversas hojas a lo largo del talo.

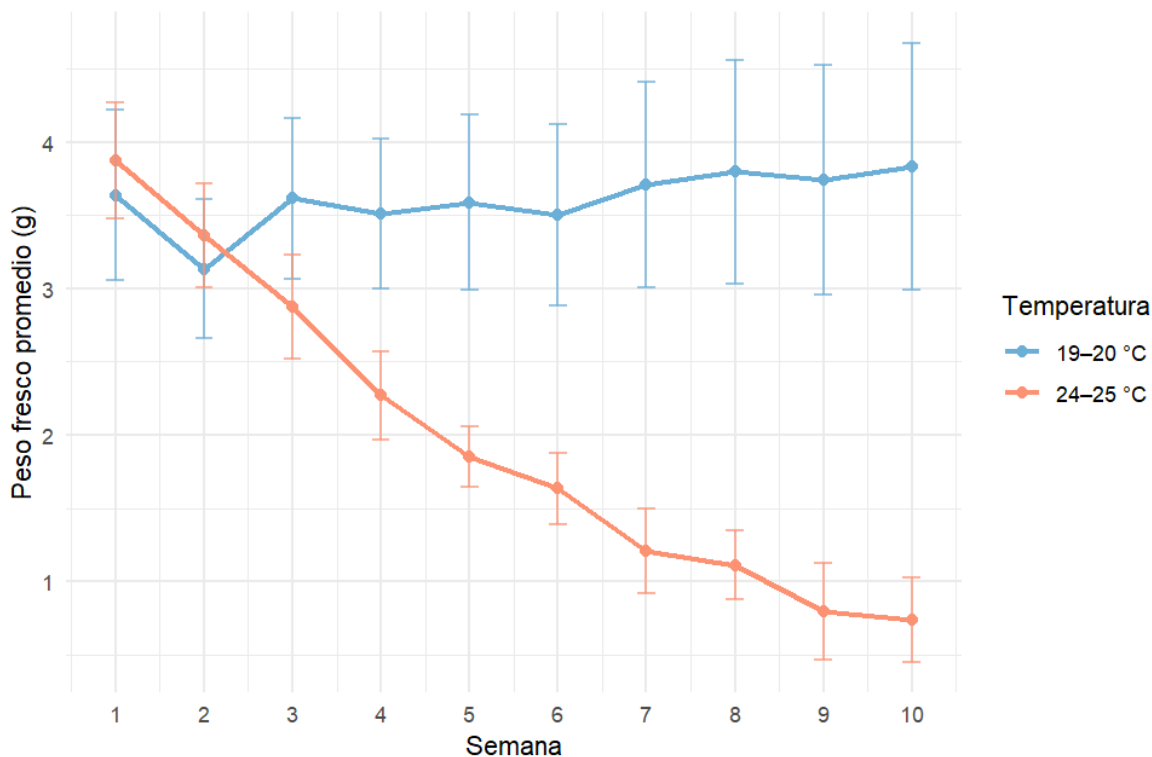


Figura 1. Crecimiento de *Sargassum liebmannii* bajo dos tratamientos de temperatura durante 10 semanas.

Promedio del peso fresco (g) \pm desviación estándar por semana en cultivos *ex situ* a 24–25 °C (rojo) y 19–20 °C (azul). Se utilizaron 8 réplicas por tratamiento.

Estos resultados sugieren que *S. liebmannii* presenta una mejor adaptación fisiológica a temperaturas más bajas, lo cual es coherente con su distribución en zonas influenciadas por afloramientos estacionales. La información generada respalda la posibilidad de cultivar esta especie en condiciones más frescas como estrategia de aprovechamiento sostenible.

3.4 Análisis estadístico del crecimiento

La tasa de crecimiento relativa (RGR) de *Sargassum liebmannii* difirió significativamente entre los tratamientos de temperatura (Fig. 2). En el tratamiento a 24–25 °C, la RGR fue negativa en todas las réplicas, con una media de -20.5 ± 11.16 %, lo que indica una pérdida sostenida de biomasa a lo largo del experimento. Por el contrario, en el tratamiento a 19–20 °C, la mayoría de las réplicas mantuvo o ganó ligeramente peso, con una media de -0.25 ± 2.55 %.

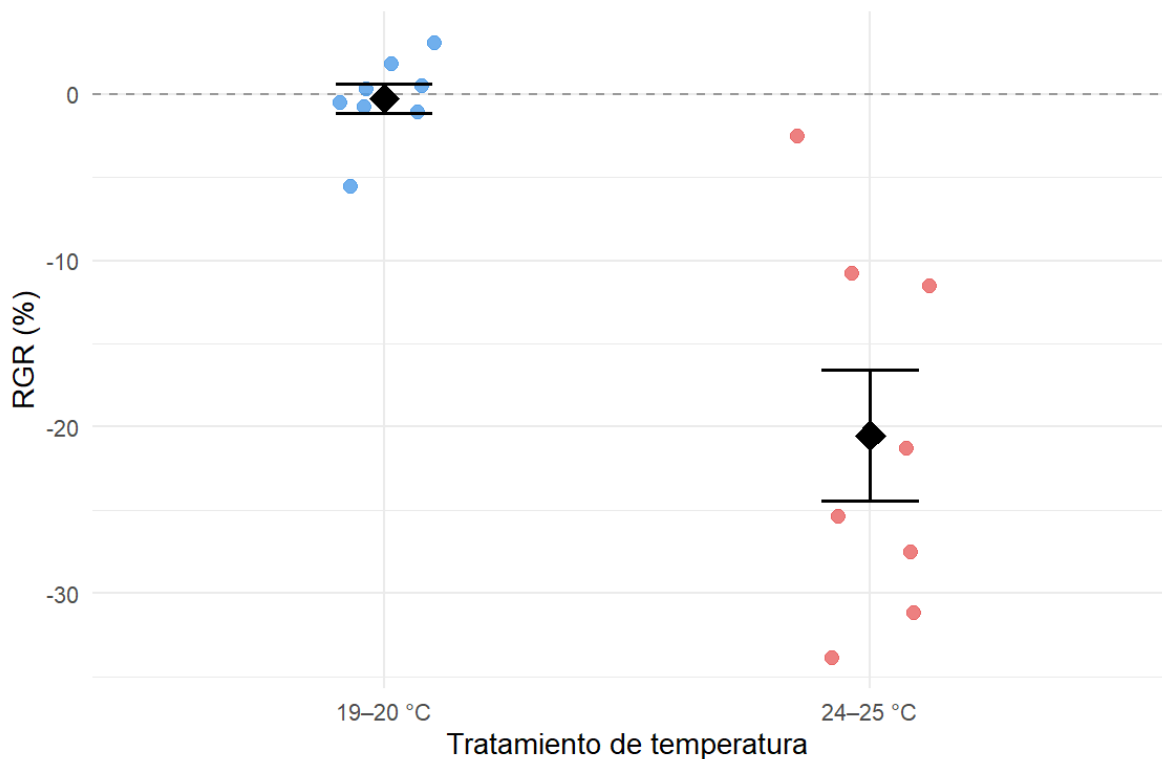


Figura 2. Tasa de crecimiento relativa (RGR) de *Sargassum liebmannii* bajo dos tratamientos de temperatura

Cada punto representa una réplica individual. El rombo negro indica la media \pm desviación estándar.

El análisis de varianza (ANDEVA) confirmó que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre la RGR ($F_{1,14}=25.07, p<0.001$), con una diferencia media de 20.26 % entre las tasas de crecimiento.

Estos resultados respaldan que *S. liebmannii* presenta una mayor estabilidad en condiciones de menor temperatura (19–20 °C), lo que concuerda con los patrones observados en el gráfico de crecimiento.

DISCUSIÓN

La caracterización fisicoquímica básica de *Sargassum liebmannii* proporciona información clave sobre su estado fisiológico y su potencial para aplicaciones industriales. En este estudio, el extracto acuoso presentó un pH cercano a la neutralidad (7.11), una

conductividad de 17.9 mS/cm, una osmolaridad de 315 mOsm/kg H₂O y una densidad de 1.0096 ± 0.0010 g/mL. Estos parámetros indican una matriz acuosa con una composición compatible con otras especies del mismo género (Baltrusch et al., 2023; Niedzbała et al., 2023), aunque con algunas variaciones —especialmente en la conductividad— que podrían atribuirse al sitio de colecta o a factores estacionales. La inclusión de estos parámetros —frecuentemente omitidos en estudios de macroalgas— contribuye al conocimiento de especies tropicales con potencial biotecnológico. Además, su pH neutro y la alta conductividad observada abren la posibilidad de explorar aplicaciones innovadoras, como la síntesis de nanopartículas (Rahman et al., 2020; El-Sheekh et al., 2022) o materiales funcionales en tecnologías energéticas (Bagheri et al., 2024; Kar et al., 2024).

El contenido de carbohidratos solubles totales en *S. liebmannii* fue de 28.4 % del peso seco. Este valor es comparable al reportado para otras especies del género, como *S. naozhouense* (29.7 %; Peng et al., 2012) y *S. muticum* (19–41 %; Aamiri et al., 2024), lo que sugiere un perfil similar de polisacáridos solubles. Esta fracción, que incluye azúcares simples y compuestos fermentables, tiene aplicaciones como fuente de energía, ingredientes prebióticos o sustrato para procesos biotecnológicos (Tu et al., 2024; Sierra et al., 2022). Por su parte, el contenido total de proteínas fue de 15%, dentro del rango esperado para macroalgas pardas (5–15 %) (Raja et al., 2022). Aunque modesto en comparación con otras, su calidad es comparable a la de las proteínas vegetales (35-80%) (Bleakley & Hayes, 2017; Morillas-Ruiz & Delgado-Alarcón, 2012; Becker, 2007) y podría aprovecharse en productos de alimentación humana o animal, así como en cosmética (Milledge et al., 2016).

El análisis fitoquímico reveló una amplia variedad de metabolitos secundarios. La detección de flavonoides, fenoles y taninos en los extractos acuosos y metanólicos sugiere un alto potencial antioxidante, antiinflamatorio y antibacteriano (Ruiz-Medina et al., 2024; Landa-Cansigno et al., 2023; Ismail et al., 2023; Park et al., 2022), lo cual es de interés para las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica. Asimismo, los carotenoides presentes en los extractos hexánicos y metanólicos podrían ser aprovechados en formulaciones fotoprotectoras o suplementos nutricionales (Balasubramaniam et al., 2020; Tabakaeva & Tabakaev, 2019; Pangestuti et al., 2018). Por otro lado, la presencia de terpenos y esteroides, detectados mediante las pruebas de Lieberman-Burchard y Salkowski, indica un posible valor

terapéutico como agentes antiinflamatorios, antitumorales y antihipertensivos (Abdelrheem et al., 2021; Agatonovic-Kustrin & Morton, 2017; Park et al., 2017).

La detección de saponinas y glicósidos cardiotónicos también refuerza el potencial farmacológico de la especie. Las primeras poseen actividad antimicrobiana y propiedades tensioactivas útiles para la industria cosmética (Kanimozhi et al., 2015), mientras que los glicósidos cardiotónicos han sido utilizados en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares como la insuficiencia cardíaca (Durga et al., 2024; Menezes et al., 2018). Asimismo, las pruebas de Molish, Tollens y Sudan confirmaron la presencia de carbohidratos complejos y grasas, lo que posiciona a *S. liebmannii* como una posible fuente de macronutrientes o insumos para la producción de bioplásticos y alimentos funcionales (Mohammed et al., 2023; Santos et al., 2020).

En conjunto, el perfil fitoquímico de *S. liebmannii* resulta comparable al de otras especies de interés biotecnológico como *S. muticum* o *S. fusiforme* (Liu et al., 2020; Pinteus et al., 2018). Esto posiciona a la especie como una candidata prometedora para la bioprospección y el desarrollo de productos con valor agregado en Costa Rica.

Los resultados del experimento de crecimiento ex situ mostraron que *S. liebmannii* mantiene una mayor estabilidad fisiológica y conservación de biomasa bajo condiciones de temperatura más bajas (19–20 °C), en contraste con la pérdida sostenida de peso fresco observada a 24–25 °C. Este patrón concuerda con su presencia en zonas influenciadas por afloramientos fríos en el Pacífico norte costarricense (Cortés et al., 2014) y con estudios que indican que otras especies de zonas templadas presentan crecimiento óptimo a temperaturas similares (Li et al., 2019). Si bien la disponibilidad de nutrientes se ha señalado como el principal factor que controla el crecimiento de macroalgas (Gao et al., 2018), nuestros resultados sugieren que la temperatura también desempeña un papel relevante en su dinámica de crecimiento y que la ausencia de incremento en biomasa a temperaturas más altas podría deberse a que estas no coinciden con su rango óptimo.

Dado que este género presenta una alta sensibilidad térmica (Li et al., 2019; Marsh et al., 2023), un siguiente paso sería ampliar las evaluaciones a un rango de 17–28 °C, que abarca las temperaturas registradas en su hábitat natural (Alfaro & Cortés, 2012), y combinar estos gradientes térmicos con distintas concentraciones de nutrientes para evaluar posibles

sinergias. De forma complementaria, sería recomendable examinar de manera independiente otras variables abióticas —como intensidad lumínica, fotoperiodo, salinidad, tasa de aireación y pH (Hurd et al. 2014; Camus & Buschmann, 2017) —, dado que todas ellas pueden incidir en el crecimiento del alga, para así encontrar su tasa específica de crecimiento máxima (Guo et al., 2015). Otro aspecto clave es la fijación al sustrato, debido a su carácter bentónico; para abordarlo, lo ideal sería probar talos en distintas fases del ciclo de vida y establecer líneas germinales mediante cultivos sexuales, evaluando el asentamiento de embriones sobre diferentes materiales —por ejemplo, cuerdas de nylon o placas de cerámica— que ya han sido empleados con éxito en otras especies tropicales del género (Largo et al., 2020; Aaron-Amper et al., 2020). Este conjunto de ensayos permitiría determinar las condiciones óptimas para la propagación, tanto vegetativa como sexual, y desarrollar protocolos de cultivo adaptados a las condiciones locales, aumentando las probabilidades de éxito en su establecimiento y producción.

La información generada a partir de estos ensayos, junto con los resultados fisicoquímicos y fitoquímicos obtenidos en este estudio, constituiría una base sólida para la valorización integral de la especie. No obstante, se recomienda avanzar hacia estudios cuantitativos más detallados, incluyendo la cuantificación específica de compuestos de interés comercial como alginatos, fucoidanos y polifenoles, así como ensayos funcionales de bioactividad. Estos esfuerzos contribuirán a establecer el potencial real de *S. liebmannii* como recurso marino sostenible y de valor estratégico para la región.

REFERENCIAS

- Aaron-Amper, J., Largo, D. B., Handugan, E. R. B., Nini, J. L., Alingasa, K. M. A., & Gulayan, S. J. (2020). Culture of the tropical brown seaweed *Sargassum aquifolium*: From hatchery to field out-planting. *Aquaculture Reports*, *16*, 100265.
- Alfaro, E. J., & Cortés, J. (2012). Atmospheric forcing of cool subsurface water events in Bahía Culebra, Gulf of Papagayo, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, *60*(2), 173-186.

- Aamiri, A., Rezzoum, N. E., Touhamia, Y., Zidane, H., Benhassan, L., Pascal, P. Y., & Lahcen, T. O. B. (2024). Seasonal variation in biochemical and metal content of the invasive seaweed *Sargassum muticum* along Moroccan Atlantic Coast. *Journal of Applied Phycology*, *36*(4), 2383-2394.
- Abdelrheem, D. A., Rahman, A. A., Elsayed, K. N., Abd El-Mageed, H. R., Mohamed, H. S., & Ahmed, S. A. (2021). Isolation, characterization, in vitro anticancer activity, dft calculations, molecular docking, bioactivity score, drug-likeness and admet studies of eight phytoconstituents from brown alga *Sargassum platycarpum*. *Journal of molecular structure*, *1225*, 129245.
- Aburto-Oropeza, O., Sala, E., Paredes, G., Mendoza, A., & Ballesteros, E. (2007). Predictability of reef fish recruitment in a highly variable nursery habitat. *Ecology*, *88*(9), 2220-2228.
- Adedapo, A., Adewuyi, T., & Sofidiya, M. (2013). Phytochemistry, anti-inflammatory and analgesic activities of the aqueous leaf extract of *Lagenaria breviflora* (Cucurbitaceae) in laboratory animals. *Revista de biologia tropical*, *61*(1), 281-290.
- Agatonovic-Kustrin, S., & Morton, D. W. (2017). High-performance thin-layer chromatography-direct bioautography as a method of choice for alpha-amylase and antioxidant activity evaluation in marine algae. *Journal of Chromatography A*, *1530*, 197-203.
- Aldana-Mejía, J. A. (2010). *Evaluación de la actividad antimicrobiana de fracciones y subfracciones obtenidas a partir de hojas de Elaeagia utilis sobre Streptococcus mutans, Streptococcus sobrinus y Lactobacillus acidophilus* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana].
- Alvarado, J. J., Ayala, A., del Castillo-Cárdenas, P., Fernández, C., Aguirre-Rubí, J., Buitrago, F., & Reyes-Bonilla, H. (2011). Coral communities of San Juan del Sur, Pacific Nicaragua. *Bulletin of Marine Science*, *87*(1), 129-146.
- Alvarado, J. J., Beita-Jiménez, A., Mena, S., Fernández, C., Cortés, J., Sánchez-Noguera, C., ... & Guzmán-Mora, A. G. (2018). Cuando la conservación no puede seguir el ritmo

del desarrollo: Estado de salud de los ecosistemas coralinos del Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(S1), S280-S308.

- Bagheri, A., Taghavi, S., Bellani, S., Salimi, P., Beydaghi, H., Panda, J. K., ... & Bonaccorso, F. (2024). Venice's macroalgae-derived active material for aqueous, organic, and solid-state supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 496, 153529.
- Balasubramaniam, V., Chelyn, L. J., Vimala, S., Fairulnizal, M. M., Brownlee, I. A., & Amin, I. (2020). Carotenoid composition and antioxidant potential of *Eucheuma denticulatum*, *Sargassum polycystum* and *Caulerpa lentillifera*. *Heliyon*, 6(8).
- Baleta, F. N., Bolaños, J. M., Ruma, O. C., Baleta, A. N., & Cairel, J. D. (2017). Phytochemicals screening and antimicrobial properties of *Sargassum oligocystum* and *Sargassum crassifolium* Extracts. *Journal of Medicinal Plants*, 5(1), 382-387.
- Baltrusch, K., Flórez-Fernández, N., Illera, M., Torres, M. D., López-Mosquera, M. E., & Domínguez, H. (2023). Potential use of *Sargassum muticum* as source of plant biostimulants after three different drying methods. *Journal of Applied Phycology*, 35(2), 921-933.
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology advances*, 25(2), 207-210.
- Bhaskar, K. (2018). Ethnobotany and conservation status of saponin rich plants of gangetic plain having both medicinal and Cleansing properties. *Plant Archives*, 18(1), 81-97.
- Bleakley, S., & Hayes, M. (2017). Algal proteins: extraction, application, and challenges concerning production. *Foods*, 6(5), 33.
- Camus, C., & Buschmann, A. H. (2017). *Macrocystis pyrifera* aquafarming: Production optimization of rope-seeded juvenile sporophytes. *Aquaculture*, 468, 107-114.
- Carvajal-Rojas, L., Hata Uribe, Y., Sierra Martínez, N., & Rueda Niño, D. (2009). Análisis fitoquímico preliminar de hojas, tallos y semillas de cupatá (*Strychnos schultesiana* Krukoff). *Colombia forestal*, 12(1), 161-170.

- Cortés, J., Samper-Villarreal, J., & Bernecker, A. (2014). Seasonal phenology of *Sargassum liebmannii* J. Agardh (Fucales, Heterokontophyta) in an upwelling area of the Eastern Tropical Pacific. *Aquatic Botany*, 119, 105-110.
- Cortés, J., Villamizar, A., Nagy, G. J., Girot, P. O., Miglioranza, K. S., & Villasante, S. (2020). Ecosistemas marino-costeros. Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos—Informe RIOCCADAPT (Moreno, JM, C).
- Doh, H., Dunno, K. D., & Whiteside, W. S. (2020). Preparation of novel seaweed nanocomposite film from brown seaweeds *Laminaria japonica* and *Sargassum natans*. *Food hydrocolloids*, 105, 105744.
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356.
- Durga, M., Deepikaa, R., Vaishnavi, M., & Raksha, B. (2024). Study on Phytochemical Composition, Biosynthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticle Using *Sargassum ilicifolium*. *Saudi J Med Pharm Sci*, 10(7), 489-501.
- El-Sheekh, M. M., Morsi, H. H., Hassan, L. H., & Ali, S. S. (2022). The efficient role of algae as green factories for nanotechnology and their vital applications. *Microbiological Research*, 263, 127111.
- Fernández-García, C., Cortés, J., Alvarado, J. J., & Nivia-Ruiz, J. (2012). Physical factors contributing to the benthic dominance of the alga *Caulerpa sertularioides* (Caulerpaceae, Chlorophyta) in the upwelling Bahía Culebra, north Pacific of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 60, 93-107.
- Fernández-García, C., Salas-Moya, C., Mena, S., Azofeifa-Solano, J. C., & Alvarado, J. J. (2021). Diversidad de los hábitats submareales de la Península de Santa Elena e Islas Murciélago, Pacífico Norte, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69, 160-179.
- Fiedler, P. C., & Lavín, M. F. (2016). Oceanographic conditions of the eastern tropical Pacific. In *Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment* (pp. 59-83). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Gao, G., Beardall, J., Bao, M., Wang, C., Ren, W., & Xu, J. (2018). Ocean acidification and nutrient limitation synergistically reduce growth and photosynthetic performances of a green tide alga *Ulva linza*. *Biogeosciences*, *15*(11), 3409-3420.
- Guo, H., Yao, J., Sun, Z., & Duan, D. (2015). Effect of temperature, irradiance on the growth of the green alga *Caulerpa lentillifera* (Bryopsidophyceae, Chlorophyta). *Journal of Applied Phycology*, *27*(2), 879-885.
- Hadiyanto, H., Prince, J., & Hovey, R. K. (2025). Modelling present and future distribution of intertidal macroalgae to evaluate the efficacy of Western Australia's marine protected areas. *Biodiversity and Conservation*, *34*(4), 1335-1363.
- Hurd, C. L., Harrison, P. J., Bischof, K., & Lobban, C. S. (2014). *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge University Press.
- Ismail, M. M., El Zokm, G. M., El Sikaily, A. M., Selim, A. I., & Ismail, G. A. (2023). Chemodiversity and bioactivity assessment of phlorotannins from some Phaeophyta species from the Red Sea. *Journal of Applied Phycology*, *35*(4), 1769-1788.
- Jha, D. K., Panda, L., Lavanya, P., Ramaiah, S., & Anbarasu, A. (2012). Detection and confirmation of alkaloids in leaves of *Justicia adhatoda* and bioinformatics approach to elicit its anti-tuberculosis activity. *Applied biochemistry and biotechnology*, *168*, 980-990.
- Joshi, N., Bhatt, S., Dhyani, S., & Nain, J. (2013). Phytochemical screening of secondary metabolites of *Argemone mexicana* linn. flowers. *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, *5*(2), 144-147.
- Jung-Kim, H. W., Hernández-Herrera, R. M., Enciso-Padilla, I., Torres-Morán, M. I., & Velasco-Ramírez, A. P. (2021). Genetic variability of *Sargassum liebmannii* on the coast of Jalisco in the central Mexican Pacific revealed by molecular markers and morphological traits. *Electronic Journal of Biotechnology*, *54*, 37-46.
- Kanimozhi, A. S., Johnson, M., & Malar, T. R. (2015). Phytochemical composition of *Sargassum Polycystum* C Agardh and *Sargassum Duplicatum* J Agardh. *Int J Pharm Pharm Sci*, *7*(8), 393-397.

- Kar, T., González-Escobar, C., Ramos-Hernández, J. J., Casales-Díaz, M., Flores-Rodríguez, M. F., Pérez, R., & Kesarla, M. K. (2024). A comprehensive analysis of *Sargassum natans*-derived inorganic carbon composite for electrochemical charge storage. *Journal of Energy Storage*, *82*, 110600.
- Khorami, F., Babaei, S., Valizadeh, S., Naseri, M., & Golmakani, M. T. (2024). Bilayer coatings for extension of the shelf life of fish fillets: Incorporating seaweed sulfated polysaccharides in chitosan-alginate LbL structures. *Food Science & Nutrition*, *12*(4), 2511-2522.
- Landa-Cansigno, C., Serviere-Zaragoza, E., Morales-Martínez, T. K., Ascacio-Valdes, J. A., Morreeuw, Z. P., Gauyat, C., ... & Reyes, A. G. (2023). The antioxidant and anti-elastase activity of the brown seaweed *Sargassum horridum* (Fucales, Phaeophyceae) and their early phenolics and saponins profiling for green cosmetic applications. *Algal Research*, *75*, 103271.
- Largo, D. B., Diola, A. G., & Rance, G. M. S. (2020). Culture of the brown seaweed *Sargassum siliquosum* J. Agardh (Phaeophyceae, Ochrophyta): from hatchery to out-planting. *Journal of Applied Phycology*, *32*(6), 4081-4098.
- Lavín, M. F., Fiedler, P. C., Amador, J. A., Ballance, L. T., Färber-Lorda, J., & Mestas-Nuñez, A. M. (2006). A review of eastern tropical Pacific oceanography: Summary. *Progress in Oceanography*, *69*(2-4), 391-398.
- Li, J., Liu, Y., Liu, Y., Wang, Q., Gao, X., & Gong, Q. (2019). Effects of temperature and salinity on the growth and biochemical composition of the brown alga *Sargassum fusiforme* (Fucales, Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*, *31*(5), 3061-3068.
- Liu, J., Luthuli, S., Yang, Y., Cheng, Y., Zhang, Y., Wu, M., ... & Tong, H. (2020). Therapeutic and nutraceutical potentials of a brown seaweed *Sargassum fusiforme*. *Food Science & Nutrition*, *8*(10), 5195-5205.
- Lizano, O. G., & Alfaro, E. J. (2014). Dinámica atmosférica y oceánica en algunos sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG), Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, *62* (4),17-31.

- Lowry, O.; N. J. Rosenbrough; A. Farr & R. J. Randall (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biology Chemistry* 193: 265-272.
- Mac Monagail, M., Cornish, L., Morrison, L., Araújo, R., & Critchley, A. T. (2017). Sustainable harvesting of wild seaweed resources. *European Journal of Phycology*, 52(4), 371-390.
- Marsh, R., Skliris, N., Tompkins, E. L., Dash, J., Dominguez Almela, V., Tonon, T., ... & Webber, M. (2023). Climate-sargassum interactions across scales in the tropical Atlantic. *Plos Climate*, 2(7), e0000253.
- Menezes, R. G., Usman, M. S., Hussain, S. A., Madadin, M., Siddiqi, T. J., Fatima, H., ... & Luis, S. A. (2018). Cerbera odollam toxicity: A review. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 58, 113-116.
- Milledge, J. J., Nielsen, B. V., & Bailey, D. (2016). High-value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, *Sargassum muticum*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(1), 67-88.
- Mohammed, A., Gaduan, A., Chaitram, P., Pooran, A., Lee, K. Y., & Ward, K. (2023). Sargassum inspired, optimized calcium alginate bioplastic composites for food packaging. *Food Hydrocolloids*, 135, 108192.
- Morillas-Ruiz, J. M., & Delgado-Alarcón, J. M. (2012). Análisis nutricional de alimentos vegetales con diferentes orígenes: Evaluación de capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales. *Nutr. clín. diet. hosp*, 32(2), 8-20.
- Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Niedzbała, N., Dziergowska, K., Wełna, M., Szymczycha-Madeja, A., Chęcmanowski, J., Bourgougnon, N., & Michalak, I. (2023). Brown seaweed *Sargassum*-based sorbents for the removal of Cr (III) ions from aqueous solutions. *Processes*, 11(2), 393.
- Pangestuti, R., Siahaan, E. A., & Kim, S. K. (2018). Photoprotective substances derived from marine algae. *Marine drugs*, 16(11), 399.

- Park, B. G., Shin, W. S., Oh, S., Park, G. M., Kim, N. I., & Lee, S. (2017). A novel antihypertension agent, sargachromenol D from marine brown algae, *Sargassum siliquastrum*, exerts dual action as an L-type Ca²⁺ channel blocker and endothelin A/B₂ receptor antagonist. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 25(17), 4649-4655.
- Park, J. S., Han, J. M., Surendhiran, D., & Chun, B. S. (2022). Physicochemical and biofunctional properties of *Sargassum thunbergii* extracts obtained from subcritical water extraction and conventional solvent extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 182, 105535.
- Peng, Y., Xie, E., Zheng, K., Fredimoses, M., Yang, X., Zhou, X., ... & Liu, Y. (2012). Nutritional and chemical composition and antiviral activity of cultivated seaweed *Sargassum naozhouense* Tseng et Lu. *Marine drugs*, 11(1), 20-32.
- Pinteus, S., Lemos, M. F. L., Alves, C., Neugebauer, A., Silva, J., Thomas, O. P., ... & Pedrosa, R. (2018). Marine invasive macroalgae: turning a real threat into a major opportunity-the biotechnological potential of *Sargassum muticum* and *Asparagopsis armata*, *Algal Res.* 34. 217–234.
- Polo, L. K., & Chow, F. (2022). Variation of antioxidant capacity and antiviral activity of the brown seaweed *Sargassum filipendula* (Fucales, Ochrophyta) under UV radiation treatments. *Applied Phycology*, 3(1), 260-273.
- Provasoli, L. (1968). Media and prospects for the cultivation of marine algae. *Cultures and collections of algae*, 63-75.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rahman, A., Kumar, S., & Nawaz, T. (2020). Biosynthesis of nanomaterials using algae. In *Microalgae cultivation for biofuels production* (pp. 265-279). Academic Press.
- Raja, K., Kadirvel, V., & Subramaniyan, T. (2022). Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition-A review. *Future Foods*, 5, 100142.

- Ríos, N. C. B., Varón, F. A., & Garzón, L. P. (2014). Extracción de pigmentos colorantes tipo flavonoides, flor del pomo (*Syzygium Jambos*). zona verde del IEAR. Florencia Caquetá. *Amazonia investiga*, 3(5), 34-42.
- Rodríguez-Quesada, J., Rodríguez-Mora, K., Bernal-Samaniego, C. A., Jirón-García, E. G., & Rojas-Alvarado, C. (2024). Development of Nanocellulose Hydrogels from *Sargassum* Seaweed as Controlled Nutrient Release Systems and their Application in Germination. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25.
- Ruiz-Medina, M. A., Sansón, M., & González-Rodríguez, Á. M. (2024). Comparative study of antioxidant potential in air-dried brown macroalgae of the Canary Islands. *LWT*, 206, 116549.
- Santos, F., Monteiro, J. P., Duarte, D., Melo, T., Lopes, D., da Costa, E., & Domingues, M. R. (2020). Unraveling the lipidome and antioxidant activity of native *Bifurcaria bifurcata* and invasive *Sargassum muticum* seaweeds: A lipid perspective on how systemic intrusion may present an opportunity. *Antioxidants*, 9(7), 642.
- Sengkhum, R., Peerakietkhajorn, S., Jeanmard, N., Pongparadon, S., Khuituan, P., Thitiphatphuvanon, T., ... & Tipbunjong, C. (2021). Effects of *Sargassum plagiophyllum* extract pretreatment on tissue histology of constipated mice. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 20(11), 2339-2346.
- Sierra, A. R. G., Amador-Castro, L. F., Ramírez-Partida, A. E., García-Cayuela, T., Carrillo-Nieves, D., & Alper, H. S. (2022). Valorization of Caribbean *Sargassum* biomass as a source of alginate and sugars for de novo biodiesel production. *Journal of Environmental Management*, 324, 116364.
- Smit, A. J. (2004). Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: A review. *Journal of applied phycology*, 16(4), 245-262.
- Stanislas, T. T., Bilba, K., Potiron, C. O., & Arsène, M. A. (2024). Effect of desalination of *Sargassum* algae on its potential use as a stabilizer in sustainable earth-based bricks. *Algal Research*, 82, 103625.

- Tabakaeva, O. V., & Tabakaev, A. V. (2019). Carotenoid profile and antiradical properties of brown seaweed *Sargassum miyabei* extracts. *Chemistry of natural compounds*, 55, 364-366.
- Tapia-Martinez, J., Hernández-Cruz, K., Franco-Colín, M., Mateo-Cid, L. E., Mendoza-Gonzalez, C., Blas-Valdivia, V., & Cano-Europa, E. (2019). Safety evaluation and antiobesogenic effect of *Sargassum liebmannii* J. Agardh (Fucales: Phaeophyceae) in rodents. *Journal of Applied Phycology*, 31(4), 2597-2607.
- Tiwari, B. K., Brunton, N. P., & Brennan, C. S. (2013). Plant food phytochemicals. *Handbook of Plant Food Phytochemicals: Sources, Stability and Extraction*, 1-4.
- Tu, C., Yu, T., Feng, S., Xu, N., Massawe, A., Shui, S., & Zhang, B. (2024). Dynamics of microbial communities, flavor, and physicochemical properties of kombucha-fermented *Sargassum fusiforme* beverage during fermentation. *Lwt*, 192, 115729.
- Uribe-Orozco, M. E., Mateo-Cid, L. E., Mendoza-González, A. C., Amora-Lazcano, E. F., González-Mendoza, D., & Durán-Hernández, D. (2018). Effect of seaweed *Sargassum vulgare* C. Agardh in soil and the development of coriander plants.
- Vanavil, B., Selvaraj, K., Aanandhalakshmi, R., Sri, K. U., & Arumugam, M. (2020). Bioactive and thermostable sulphated polysaccharide from *Sargassum swartzii* with drug delivery applications. *International journal of biological macromolecules*, 153, 190-200.
- Vidaurre-Castillo, D., Zavaleta-Portilla, S., & Silva-Chuquipoma, D. (2023). Influence of Culture Conditions on the Growth of Red Macroalgae. A systematic review. *LACCEI*, 1(8).
- Yeong, B. M., & Wong, C. (2013). Seasonal growth rate of *Sargassum* species at Teluk Kemang, Port Dickson, Malaysia. *Journal of applied phycology*, 25(3), 805-814.
- Zou, X. X., Xing, S. S., Su, X., Zhu, J., Huang, H. Q., & Bao, S. X. (2017). The effects of temperature, salinity and irradiance upon the growth of *Sargassum polycystum* C. Agardh (Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1207-1215.

Cuadro S1. Tasa de crecimiento relativa (RGR) en porcentaje de *Sargassum liebmannii* en cada réplica experimental bajo dos tratamientos de temperatura (24–25 °C y 19–20 °C).

Tratamiento	Réplica	RGR
24–25 °C	1	-33.9
24–25 °C	2	-21.3
24–25 °C	3	-10.7
24–25 °C	4	-25.4
24–25 °C	5	-27.6
24–25 °C	6	-31.2
24–25 °C	7	-2.5
24–25 °C	8	-11.4
19–20 °C	9	1.9
19–20 °C	10	3.2
19–20 °C	11	0.3
19–20 °C	12	-1.0
19–20 °C	13	-0.7
19–20 °C	14	-5.5
19–20 °C	15	-0,5
19–20 °C	16	0.5

CONCLUSIONES GENERALES

El género *Sargassum* representa un recurso estratégico para las regiones costeras del Pacífico Centroamericano, no solo por su rol ecológico como formador de hábitats complejos, sino también por su potencial para aplicaciones sostenibles en múltiples sectores. Esta tesis integró conocimientos fundamentales sobre su diversidad, composición bioquímica y capacidad de cultivo, con el fin de sentar bases científicas sólidas que orienten su aprovechamiento responsable en Costa Rica.

Los resultados obtenidos evidencian que, si bien las investigaciones sobre usos de *Sargassum* se han concentrado principalmente en Asia y Europa, existen oportunidades significativas para diversificar su estudio y aplicación en el contexto regional. A través de un enfoque que combina revisión bibliográfica, análisis filogenético, caracterización morfológica y pruebas aplicadas, se demostró que la diversidad de *Sargassum* en el Pacífico centroamericano ha sido históricamente sobreestimada. Como parte de este esfuerzo, se logró delimitar taxonómicamente a las especies presentes y describir una nueva especie para la ciencia, *Sargassum lacrucense*, lo cual representa un avance clave para la comprensión y conservación de la biodiversidad marina de la región.

Adicionalmente, se identificaron compuestos de la especie dominante en los bosques de la región, con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antibacterianas, así como una notable adaptabilidad fisiológica al crecimiento bajo temperaturas más frías, propias de zonas de afloramiento costero. Estos hallazgos no solo refuerzan el valor funcional de *S. liebmannii*, sino que también abren la posibilidad de desarrollarla como materia prima para productos farmacéuticos, cosméticos, alimentarios o biomateriales. A su vez, la evaluación de su crecimiento ex situ proporciona información crucial para el diseño de estrategias de cultivo, contribuyendo a la transición desde el uso extractivo hacia sistemas productivos sostenibles.

El conocimiento generado en este trabajo reduce brechas de información sobre el género *Sargassum* en el Pacífico Este Tropical y ofrece un modelo replicable para el estudio y aprovechamiento de otras macroalgas marinas. Este enfoque resulta especialmente relevante en un contexto donde la conservación de la biodiversidad y la búsqueda de alternativas sostenibles se tornan urgentes. Avanzar hacia el uso responsable de estos

recursos requiere comprender tanto su biología como su aplicación potencial, y esta tesis respalda la posibilidad de integrar ambos enfoques para contribuir al desarrollo sostenible de las zonas costeras.

REFERENCIAS

- Alam, F., Date, A., Rasjidin, R., Mobin, S., Moria, H., & Baqui, A. (2012). Biofuel from algae-Is it a viable alternative? *Procedia Engineering*, 49, 221-227.
- Algae biofertilisers promote sustainable food production and a circular nutrient economy—An integrated empirical-modelling study. *Science of the Total Environment*, 796, 148913.
- Alshehri, M. A., Aziz, A. T., Alzahrani, O., Alasmari, A., Ibrahim, S., Osman, G., & Bahattab, O. (2019). DNA-barcoding and Species Identification for Some Saudi Arabia Seaweeds using rbcL Gene. *Journal of Pure & Applied Microbiology*, 13(4).
- Alvarado, J. J., Azofeifa-Solano, J. C., Beita-Jiménez, A., Cortés, J., Mena, S., Salas-Moya, C., & Fernández-García, C. (2021). Reef environments of Murciélago Islands and Santa Elena peninsula, Guanacaste conservation area, Costa Rican Pacific. *Scientia Insularum: Revista de Ciencias Naturales en Islas*, (4), 45-61
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2005). *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC press.
- Bernecker, A. (2009). Marine benthic algae. In: (I.S. Wehrtmann and J. Corté's, eds). *Marine Biodiversity of Costa Rica, Central America*. Springer, Berlin. pp. 109–118.
- Cardoso, S. M., Pereira, O. R., Seca, A. M., Pinto, D. C., & Silva, A. M. (2015). Seaweeds as preventive agents for cardiovascular diseases: From nutrients to functional foods. *Marine Drugs*, 13(11), 6838-6865.
- Cortés, J. 1993. Ambientes Marinos. In: (FUNDEVI, ICT, SPN, UCR, eds) Plan general de manejo para el Parque Nacional Manuel Antonio, Sondeo ecológico rápido. San José. pp. 122–128.
- Cortés, J., Samper-Villarreal, J., & Bernecker, A. (2014). Seasonal phenology of *Sargassum liebmannii* J. Agardh (Fucales, Heterokontophyta) in an upwelling area of the Eastern Tropical Pacific. *Aquatic Botany*, 119, 105-110.

- Dawson, E. Y. (1957). Marine algae from the Pacific Costa Rican gulfs. *Contributions in Science*, 15, 1-28.
- FAO. (2018). The global status of seaweed production, trade and utilization. Globefish Research Programme. Volumen 124, Roma, Italia.
- Faye, E. J., H. Wei Wang, S. Kawaguchi, S. Shimada & M. Masuda. (2004). Reinstatement of *Grateloupia subpectinata* (Rhodophyta, Halymeniaceae) based on morphology and rbcL sequences. *Phycological Research* 52, 59–67.
- Fernández-García, C., R. Riosmena-Rodríguez, B. Wysor, O. Tejada, J. Cortés. (2011). Checklist of the Pacific Marine Macroalgae of Central America. *Botanica Marina* 54: 53-73.
- Graham, L. & L.W. Wilcox. (2000). *Algae*. Pearson Education Inc. Second Edition San Francisco.
- Guiry, M. D. & G. M. Guiry. 2010. AlgaeBase version 4.2. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, <http://www.algaebase.org>; searched on 5 February 2010.
- Hayden, H. S., J. Blomster, C. A. Maggs, P. C. Silva, M. J. Stnhope & J. R. Waaland. (2003). Linnaeus was right all along: *Ulva* and *Enteromorpha* are not distinct genera. *European Journal of Phycology* 38, 277–294.
- Janarthanan, M., & Kumar, M. S. (2017). Novel improvement of bioactive microencapsulated textile products using brown seaweed for healthcare applications. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 29(2), 200-214.
- Khompatara, K., Pettongkhao, S., Kuyyogsuy, A., Deenamo, N., & Churngchow, N. (2019). Enhanced resistance to leaf fall disease caused by *Phytophthora palmivora* in rubber tree seedling by *Sargassum polycystum* extract. *Plants*, 8(6), 168.
- Lee, R. E. (2018). *Phycology*. Cambridge university press.

- León, R. Á., Pardo, C. M. P., & Rangel, A. A. T. (2007). Evaluación y utilización potencial de las macroalgas marinas del Caribe y el Pacífico de Colombia: Estado actual de su conocimiento. *Biosalud*, 6, 113-129.
- Lopes, D., Rey, F., Leal, M. C., Lillebø, A. I., Calado, R., & Domingues, M. R. (2021). Bioactivities of lipid extracts and complex lipids from seaweeds: Current knowledge and future prospects. *Marine Drugs*, 19(12), 686.
- Mattio, L., & Payri, C. E. (2011). 190 years of *Sargassum* taxonomy, facing the advent of DNA phylogenies. *The Botanical Review*, 77(1), 31-70.
- Mattio, L., Payri, C. E., & Verlaque, M. (2009). Taxonomic revision and geographic distribution of the subgenus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) in the Western and Central Pacific Islands based on morphological and molecular analyses. *Journal of Phycology*, 45(5), 1213-1227.
- Mattio, L., Payri, C. E., Verlaque, M., & de Reviere, B. (2010). Taxonomic revision of *Sargassum* sect. *Acanthocarpicae* (Fucales, Phaeophyceae). *Taxon*, 59(3), 896-904.
- Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Phillips, N. (1995). Biogeography of *Sargassum* (Phaeophyta) in the Pacific basin. Pp 107–144. In: Abbott, I. A. (ed). *Taxonomy of economic seaweeds with reference to some Pacific species*, vol. 5. California Sea Grant College Program, La Jolla, California.
- Prasedya, E. S., Frediansyah, A., Martyasari, N. W. R., Ilhami, B. K., Abidin, A. S., Padmi, H., ... & Sunarwidhi, A. L. (2021). Effect of particle size on phytochemical composition and antioxidant properties of *Sargassum cristaefolium* ethanol extract. *Scientific Reports*, 11(1), 1-9.
- Robaina-Romero, R. (1988). Biotecnología del cultivo in vitro de algas rojas (Rhodophyta) de interes industrial [*Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Canarias].
- Robba, L., S. J. Russell, G. L. Barker & J. Brodie. (2006). Assessing the use of the mitochondrial cox1 marker for use in DNA barcoding of red algae (Rhodophyta). *American Journal of Botany* 93, 1101–1108.

- Rodríguez-Rodríguez, E. F., Fernández Honores, M. A., Alvítez Izquierdo, E., Pollack Velásquez, L. E., Luján Bulnes, L. A., Geldres Cruz, C. W., & Paredes Pizarro, Y. (2018). Algas marinas del litoral de la región La Libertad, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 71-81.
- Saraswathi, S. J., Babu, B., & Rengasamy, R. (2003). Seasonal studies on the alginate and its biochemical composition I: *Sargassum polycystum* (Fucales), Phaeophyceae. *Phycological Research*, 51(4), 240-243.
- Shekhawat, D. S., Bhatnagar, A., Bhatnagar, M., & Panwar, J. (2012). Potential of treated dairy waste water for the cultivation of algae and waste water treatment by algae. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2(1), 101-104.
- Smit, A. J. (2004). Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: A review. *Journal of Applied Phycology*, 16: 245–262.
- Soheili, M., & Khosravi-Darani, K. (2011). The potential health benefits of algae and micro algae in medicine: a review on *Spirulina platensis*. *Current Nutrition & Food Science*, 7(4), 279-285.
- Taylor, W.R. 1945. Pacific marine algae of the Allan Hancock expeditions to the Galapagos Islands. *Allan Hancock Pacific Expeditions 12*, 1–528.
- Thibaut, T., S. Pinedo, X. Torras & E. Ballesteros. (2005). Long-term decline of the populations of Fucales (*Cystoseira* spp. and *Sargassum* spp.) in the Albères coast (France, North-western Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin* 50: 1472–1489.
- Torres M. R., Sousa A. P. A., Silva A. T., Melo D. F., Feitosa J. P. A., Paula R. C. M. & Lima M. G. S. (2007) Extraction and physicochemical characterization of *Sargassum vulgare* alginate from Brazil. *Carbohydrate Research* 342, 2067-2074.
- Ullmann, J., & Grimm, D. (2021). Algae and their potential for a future bioeconomy, landless food production, and the socio-economic impact of an algae industry. *Organic Agriculture*, 11(2), 261-267.
- Upadhyay, A. K., & Singh, D. P. (Eds.). (2020). *Algae and Sustainable Technologies: Bioenergy, Nanotechnology and Green Chemistry*. CRC Press.

- Wang, H. M. D., Chen, C. C., Huynh, P., & Chang, J. S. (2015). Exploring the potential of using algae in cosmetics. *Bioresource Technology*, *184*, 355-362.
- Yeong, B. M., & Wong, C. (2013). Seasonal growth rate of *Sargassum* species at Teluk Kemang, Port Dickson, Malaysia. *Journal of Applied Phycology*, *25*(3), 805-814.
- Zou, X. X., Xing, S. S., Su, X., Zhu, J., Huang, H. Q., & Bao, S. X. (2018). The effects of temperature, salinity and irradiance upon the growth of *Sargassum polycystum* C. Agardh (Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*, *30*(2), 1207-1215.

