



Acta Botanica  
Mexicana

# Evaluación de la composición nutricional y fitoquímica de macroalgas marinas asociadas al ecosistema de manglar del Pacífico colombiano

## Evaluation of the nutritional and phytochemical composition of marine macroalgae associated with the Colombian Pacific mangrove ecosystem

Enrique Javier Peña Salamanca<sup>1</sup> , Angie Cristina Zuñiga Lara<sup>1,3</sup> , Zharic Liceth Marquez Bueno<sup>2</sup> ,  
Lizbeth Lorena López Parra<sup>2</sup> 

### Resumen:

**Antecedentes y Objetivos:** Las algas marinas son de gran interés por sus compuestos bioactivos con aplicaciones biotecnológicas en industrias farmacéuticas, cosméticas, alimentarias y agronómicas. El objetivo de este trabajo fue determinar la composición nutricional y fitoquímica de tres macroalgas asociadas a las raíces de *Rhizophora mangle*: *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium*.

**Métodos:** Las muestras se colectaron en el manglar de la Bahía de Buenaventura, en el Pacífico colombiano. La composición nutricional se evaluó mediante análisis de cenizas, proteínas, fibra cruda y minerales, según los protocolos de la AOAC. Los extractos se obtuvieron con acetona (99.5%). Se realizó un tamizaje preliminar de metabolitos secundarios y se utilizó la técnica GC-MS para identificar los compuestos.

**Resultados clave:** Entre las tres especies analizadas, se encontraron variaciones en el porcentaje de cenizas (16.9-31.5), fibra cruda (2.52-30.2), proteínas (14.6-25) y nitrógeno (2.3-4). Los minerales más representativos fueron el potasio (30,100-35,000 mg kg<sup>-1</sup>), azufre (29,400-70,600 mg kg<sup>-1</sup>), hierro (1880-9180 mg kg<sup>-1</sup>), sodio (7330-46,700 mg kg<sup>-1</sup>), magnesio (7960-16,600 mg kg<sup>-1</sup>), calcio (5510-6860 mg kg<sup>-1</sup>), fósforo (800-1270 mg kg<sup>-1</sup>) y manganeso (204-4730 mg kg<sup>-1</sup>). En los extractos de todas las especies se detectaron alcaloides, esteroides, terpenos, glucósidos cardiotónicos y saponinas. Mediante análisis GC-MS se identificaron 14 compuestos volátiles en los extractos de *Bostrychia calliptera* (ocho compuestos), *Catenella impudica* (2) y *Rhizoclonium riparium* (7). Los compuestos comunes en todas las especies fueron el eicosano, 2-metiloctacosano, 2-metileicosano y el 3-metileicosano.

**Conclusiones:** Las macroalgas estudiadas mostraron un alto contenido de nutrientes esenciales, como potasio, azufre, hierro y manganeso, sugiriendo su potencial como biofertilizantes o suplementos. Además, varios de los compuestos identificados han demostrado actividades biológicas relevantes para la farmacología y la cosmetología. Estos hallazgos destacan el potencial de las macroalgas y contribuyen al conocimiento para el aprovechamiento sostenible de los recursos del manglar en el Pacífico colombiano.

**Palabras clave:** compuestos bioactivos, extractos, GC-MS, macroalgas marinas, nutrientes esenciales.

### Abstract:

**Background and Aims:** Marine algae are of great interest for their bioactive compounds with biotechnological applications in pharmaceutical, cosmetic, food, and agronomic industries. The objective of this work was to determine the nutritional and phytochemical composition of three macroalgae associated with the roots of *Rhizophora mangle*: *Bostrychia calliptera*, *Rhizoclonium riparium* and *Catenella impudica*.

**Methods:** Samples were collected in the mangrove swamp of Buenaventura Bay, in the Colombian Pacific. Nutritional composition was evaluated by ash, protein, crude fiber and mineral analysis, according to AOAC protocols. Extracts were obtained with acetone (99.5%). A preliminary screening for secondary metabolites was performed and GC-MS was used to identify the compounds.

**Key results:** Among the three species analyzed, variations were found in the percentage of ash (16.9-31.5), crude fiber (2.52-30.2), protein (14.6-25) and nitrogen (2.3-4). The most representative minerals were potassium (30,100-35,000 mg kg<sup>-1</sup>), sulfur (29,400-70,600 mg kg<sup>-1</sup>), iron (1880-9180 mg kg<sup>-1</sup>), sodium (7330-46,700 mg kg<sup>-1</sup>), magnesium (7960-16,600 mg kg<sup>-1</sup>), calcium (5510-6860 mg kg<sup>-1</sup>), phosphorus (800-1270 mg kg<sup>-1</sup>) and manganese (204-4730 mg kg<sup>-1</sup>). Alkaloids, sterols, terpenes, cardiotonic glycosides and saponins were detected in the extracts of all species. By GC-MS analysis, 14 volatile compounds were identified in the extracts of *Bostrychia calliptera* (eight compounds), *Catenella impudica* (2) and *Rhizoclonium riparium* (7). The common compounds in all species were eicosane, 2-methyloctacosane, 2-methyleicosane and 3-methyleicosane.

**Conclusions:** The studied macroalgae showed a high content of essential nutrients, such as potassium, sulfur, iron and manganese, suggesting their potential as biofertilizers or supplements. In addition, several of the identified compounds have demonstrated biological activities relevant to pharmacology and cosmetology. These findings highlight the potential of macroalgae and contribute to the knowledge for the sustainable use of mangrove resources in the Colombian Pacific.

**Key words:** bioactive compounds, essential nutrients, extracts, GC-MS, marine macroalgae.

<sup>1</sup>Universidad del Valle, Departamento de Biología, Grupo de Investigación Biología de Plantas y Microorganismos, Campus Meléndez Calle 13 #100-00, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>2</sup>Universidad del Valle, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Productos Naturales y Alimentos, Campus Meléndez Calle 13 #100-00, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>3</sup>Autor para la correspondencia: [angie.zuniga@correounivalle.edu.co](mailto:angie.zuniga@correounivalle.edu.co)

Recibido: 3 de octubre de 2024.

Revisado: 22 de octubre de 2024.

Aceptado por Marie-Stéphanie Samain: 7 de febrero de 2025.

Publicado Primero en línea: 31 de marzo de 2025.

Publicado: Acta Botanica Mexicana 132 (2025).



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Citar como: Peña Salamanca, E. J., A. C. Zuñiga Lara, Z. L. Marquez Bueno y L. L. López Parra. 2025. Evaluación de la composición nutricional y fitoquímica de macroalgas marinas asociadas al ecosistema de manglar del Pacífico colombiano. Acta Botanica Mexicana 132: e2412. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm132.2025.2412>

e-ISSN: 2448-7589

## Introducción

En los manglares del pacífico colombiano, la flora de algas asociadas a las raíces de los mangles se conoce comúnmente como el complejo *Bostrychietum*, que es una agrupación de algas compuestas principalmente por los géneros *Bostrychia* Montagne (Rhodomelaceae, Ceramiales), *Caloglossa* (Harvey) G. Martens (Delesseriaceae, Ceramiales), *Catenella* Greville (Caulacanthaceae, Gigartinales) y la especie *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey (Cladophoraceae, Cladophorales) (Gyi y Htun, 2013; Murillo-Muñoz y Peña-Salamanca, 2014; Salgado y Peña-Salamanca, 2016; Peña-Salamanca, 2017). Estas algas no solo contribuyen significativamente a la producción de carbono orgánico y de nitrógeno (Ortega et al., 2020; Regina Hershey et al., 2021; Erlania et al., 2023), sino que también actúan como bioindicadores de contaminación (Rios-Marín et al., 2021). Las raíces del manglar les proporcionan una superficie amplia y húmeda disponible para su colonización por estas algas (Peña-Salamanca, 2017). Sin embargo, el manglar impone retos ambientales importantes a estos organismos debido a las fluctuaciones de humedad, salinidad, luz, temperatura, nutrientes, desecación durante las mareas bajas y acción de las olas (Banerjee et al., 2009; Peña-Salamanca, 2017; Borburema et al., 2020). Además, presentan presiones biológicas como depredación, competencia, parasitismo y alelopatía (Park et al., 2023).

Como respuesta adaptativa a estas condiciones estresantes, las macroalgas de los manglares sintetizan una variedad de compuestos bioactivos que les permiten sobrevivir. Por ejemplo, se ha documentado que las especies del género *Bostrychia* presentan estrategias fisiológicas para tolerar el cambio climático, como el aumento en la síntesis y acumulación de osmolitos, tales como el dulcitol y sorbitol, en respuesta al incremento de temperatura y estrés salino (Borburema et al., 2022, 2024). Además, estas especies producen carotenoides, clorofilas y aminoácidos similares a micosporinas para resistir el estrés lumínico (Orfanoudaki et al., 2023; Urrea-Victoria et al., 2023). Por otro lado, en *Catenella repens* (Lightfoot) Batters se han observado variaciones en la concentración de proteínas, lípidos, carbohidratos y astaxantina como adaptación a la variación de las condiciones climáticas en el manglar del delta del Ganges, India (Banerjee et al., 2009).

Además de estas adaptaciones, varios estudios han identificado compuestos bioactivos en macroalgas de manglares con importantes propiedades biológicas. En particular, los extractos de *Bostrychia tenella* (J.V.Lamouroux) J.Agardh han demostrado propiedades antioxidantes (Martins et al., 2013), antiparasíticas y antifúngicas (de Felício et al., 2010). Mientras que en *Bostrychia montagnei* Harvey se han extraído galactanos sulfatados con actividad antiviral (Duar-te et al., 2001). Por otro lado, los extractos de *Caloglossa ogasawaraensis* Okamura y *Caloglossa beccarii* (Zanardini) De Toni han mostrado actividad antioxidante (Chankaew et al., 2016, 2021). Asimismo, en *Rhizoclonium riparium* se identificaron polisacáridos solubles que presentan propiedades inmunológicas (Hsu et al., 2006). A pesar de estos hallazgos, el potencial biotecnológico de las macroalgas de manglares es poco explorado, lo cual revela una brecha significativa en el conocimiento científico sobre estas especies.

Por otro lado, las algas marinas en general se caracterizan por su alta concentración de minerales esenciales (Lorenzo et al., 2017; Neto et al., 2018; Campos et al., 2022; Čmíková et al., 2022). Llegan a tener aplicaciones tanto en la formulación de suplementos dietéticos para humanos y animales (Wan et al., 2019; Morais et al., 2020; Peñalver et al., 2020; Narvaez-Izquierdo et al., 2024), como en la producción de fertilizantes (Aron Santhosh Kumar et al., 2024). Por ejemplo, la aplicación de *Sargassum* sp. y *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis mejora la composición mineral del suelo, estimula la germinación, el crecimiento, floración y fructificación de las plantas, además de promover su resistencia a las enfermedades y la tolerancia a la sequía (Shukla et al., 2019; Thompson et al., 2020; Aron Santhosh Kumar et al., 2024).

En el caso de las macroalgas asociadas a los manglares, los estudios sobre su contenido mineral son limitados. No obstante, en especies como *Rhizoclonium riparium* se ha documentado una notable concentración de minerales, especialmente yodo (Afonso et al., 2018). Se estima que el consumo de 2 g de esta alga seca podría ser suficiente para cubrir las ingestas diarias recomendadas de yodo (Afonso et al., 2018), lo que la convierte en una candidata potencial para el desarrollo de suplementos alimenticios, especialmente en regiones donde la deficiencia de yodo representa un problema de salud pública (FAO, 2018).



A pesar de la importancia de las algas asociadas a los manglares, las investigaciones dedicadas a la exploración de su composición nutricional y química son limitadas, especialmente en especies del pacífico colombiano (por ejemplo, Lenis et al., 2007; Urrea-Victoria et al., 2023). Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la composición nutricional y fitoquímica de tres especies silvestres asociadas a las raíces de *Rhizophora mangle* L. en la Bahía de Buenaventura: *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne, *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh y *Rhizoclonium riparium*.

## Materiales y Métodos

### Muestreo

Se recolectaron talos de *Bostrychia calliptera* (Fig. 1A), *Rhizoclonium riparium* (Fig. 1B) y *Catenella impudica* (Fig. 1C) en el manglar ubicado en la desembocadura del río Dagua (3°51'41.1"N, 77°03'59.5"W), frente a la Bahía de Buenaventura, departamento del Valle del Cauca, Colombia, en junio 2023. Las algas se recolectaron de las raíces de *Rhizophora mangle* (Fig. 1D). Para la especie *Bostrychia calliptera*, se tomaron muestras según su distribución de crecimiento vertical a lo largo de la raíz del manglar, clasificándolas en zona media y zona alta, siendo esta última el nivel correspondiente a la máxima inundación mareal (Peña-Salamanca, 2017).

Posteriormente las muestras fueron almacenadas en bolsas de cierre herméticas marca Ziploc®, refrigeradas a 4 °C y transportadas al Laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Biología de la Universidad del Valle (Colombia) para su procesamiento. La identificación de las especies se basó en las descripciones taxonómicas de Salgado y Peña-Salamanca (2016). Los especímenes se depositaron en el herbario CUVV de la Universidad del Valle, con los siguientes números de registro: *Bostrychia calliptera* (85538 y 85539), *Catenella impudica* (85540) y *Rhizoclonium riparium* (85541).

### Análisis nutricional

Se realizó un análisis de composición nutricional de las algas colectadas, que incluyó la determinación del porcentaje de cenizas, fibra cruda, proteína cruda y minerales (fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, boro, cobre, hierro,

manganeso, zinc y sodio), utilizando los métodos de la Asociación de Colaboración Analítica Oficial (AOAC, 2006). El contenido de nitrógeno orgánico se calculó con el método de Kjendahl, donde el porcentaje de proteína fue dividido por 6.25 (Nova et al., 2023).

### Extracción

Las algas se secaron en horno (Heraeus modelo SUT6060, Hanau, Alemania) a 60 °C durante 48 horas, luego se maceraron con mortero y se sometieron a extracción con acetona (99.5%). Se añadieron 10 ml de acetona por cada 2 g de muestra y se dejaron en reposo durante 24 horas. Posteriormente, se trató la muestra en un ultra sonicador (Branson Ultrasonics modelo 5510R-MT, Brookfield, EUA) durante 20 minutos y se filtró para recoger el solvente con los extractos. El solvente fue evaporado utilizando un evaporador rotativo (IKA modelo RV 10 digital, Staufen, Alemania), ajustado a 60 °C, 80 RPM y una presión de 556 mbar.

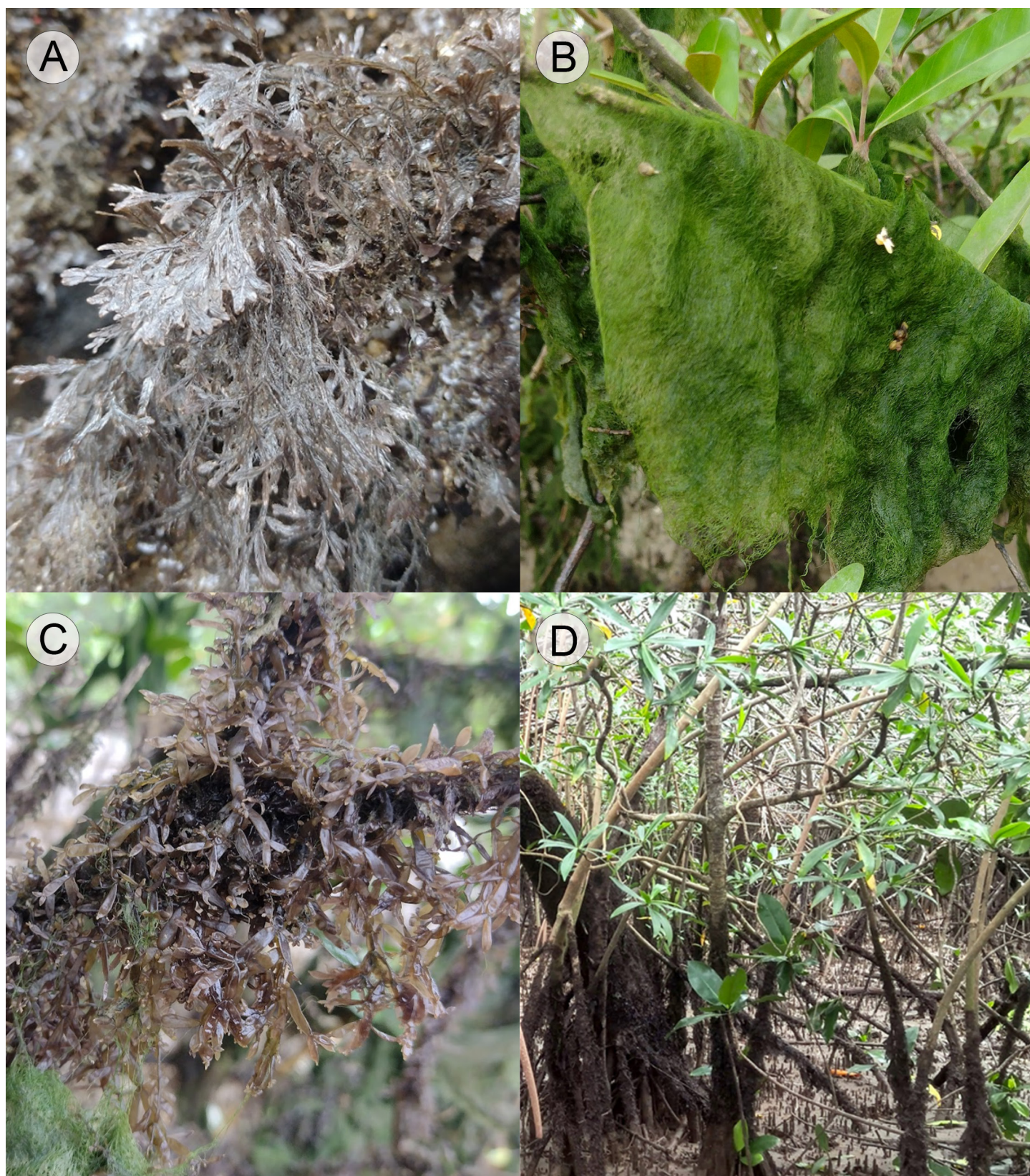
### Tamizaje fitoquímico

Los extractos obtenidos fueron evaluados para determinar la presencia de metabolitos secundarios, mediante las siguientes técnicas: la prueba de Dragendorff para la detección de alcaloides (Mubashrah et al., 2020), la prueba de cloruro férrico para la detección de taninos (Mubashrah et al., 2020), la prueba de Liebermann-Burchard para la identificación de esteroides y terpenos (Silva et al., 2020), la prueba de Kedde para la determinación de glucósidos cardiotónicos (García-Granados et al., 2019), la prueba de Shinoda para la detección de flavonoides (Abdu et al., 2019), y la prueba de Salkowski para la identificación de saponinas (Mubashrah et al., 2020).

### Análisis GC-MS

Los análisis de cromatografía de gases acoplado a espectroscopia de masas (GC-MS) se llevaron a cabo en el laboratorio del Grupo de Investigación en Productos Naturales y Alimentos (GIPNA) de la Universidad del Valle, Colombia. Se utilizaron 2 mg de cada extracto, a los cuales se les agregó 1 ml de metanol (99.9% grado HPCL) y se sometieron a sonicación (Branson Ultrasonics modelo 5510R-MT, Brookfield, EUA) durante 10 minutos. De la solución resultante de extracto con metanol, se tomaron 2 µl para los análisis. Se





**Figura 1:** Fotografías del ecosistema de manglar de Buenaventura, Colombia. A. *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne; B. *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey; C. *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh; D. *Rhizophora mangle* L. Fotografías: Angie Cristina Zuñiga Lara.

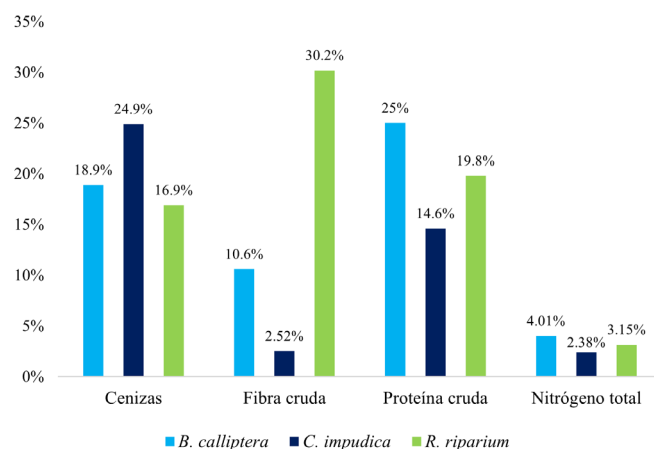
utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas (Shimadzu Scientific Instruments, modelo QP2010 Ultra, Kioto, Japón), equipado con una columna capilar Rxi-1HT GC (30 m × 0.32 mm, 0.10 µm) (Restek Corporation, Bellefont, EUA). El programa de temperatura del horno de columna (Shimadzu Scientific Instruments, modelo QP2010 Ultra, Kioto, Japón) comenzó con 40 °C durante 2 minutos, con un aumento de 10 °C/min hasta alcanzar 360 °C manteniendo esta temperatura durante 10 minutos. Las temperaturas del IonSource y de la Interfaz fueron de 240 y 200 °C, respectivamente. La temperatura del módulo de entrada de las muestras se incrementó a una tasa de 10 °C min<sup>-1</sup> hasta 350 °C y se mantuvo durante 20 minutos. El rango de masas analizado fue de 35 a 600 m/z, con una velocidad de escaneo de 1250 unidades por segundo. Los datos se adquirieron desde los 5 hasta los 44 minutos. Los compuestos orgánicos volátiles presentes en las muestras fueron anotados mediante la comparación de los espectros de masas con la biblioteca espectral NIST WEBBOOK (Linstrom y Mallard, 2001).

## Resultados

### Análisis nutricional

La composición proximal de las especies *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium* se presenta en la figura 2. El porcentaje de cenizas varió entre 16.9 y 24.9%. La fibra cruda mostró variabilidad, con valores entre 2.52 y 10.6% para las dos algas rojas, mientras que *Rhizoclonium riparium* presentó una mayor cantidad de fibra cruda (30.2%). El contenido de proteínas fue similar, oscilando entre 14.6 y 25%. Por su parte, el contenido de nitrógeno fue mayor en *Bostrychia calliptera* (4.01%), seguido de *Rhizoclonium riparium* (3.15%) y *Catenella impudica* (2.38%).

En relación con la composición mineral de las algas, los macrominerales como el fósforo (800-1270 mg kg<sup>-1</sup>), potasio (30,100-35,000 mg kg<sup>-1</sup>) y calcio (50,106,860 mg kg<sup>-1</sup>) presentaron una menor variabilidad en sus rangos en comparación con el magnesio (7960-16,600 mg kg<sup>-1</sup>), azufre (29,400-70,600 mg kg<sup>-1</sup>) y sodio (7330-46,700 mg kg<sup>-1</sup>). Por otro lado, los micronutrientes mostraron una mayor variabilidad en sus concentraciones, incluyendo al hierro (1880-9180 mg kg<sup>-1</sup>), manganeso (204-4730 mg kg<sup>-1</sup>), cobre (20.7-



**Figura 2:** Porcentaje de cenizas, fibra cruda, proteína cruda y nitrógeno total en *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne (azul claro), *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh (azul oscuro) y *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey (verde).

73.1 mg kg<sup>-1</sup>), zinc (26.4-50.2 mg kg<sup>-1</sup>) y boro (51.2-143 mg kg<sup>-1</sup>) (Cuadro 1).

### Tamizaje fitoquímico y análisis GC-MS

De acuerdo con el tamizaje fitoquímico, en los extractos algales de todas las especies se detectó la presencia de alcaloides, esteroides, terpenos, glicósidos cardiotónicos y saponinas. Por otro lado, mediante los análisis de cromatografía de gases acoplado a espectroscopia de masas (GC-MS), se identificaron 14 compuestos volátiles en los extractos de *Bostrychia calliptera* de zona media (ocho compuestos) y zona alta (8), *Catenella impudica* (2) y *Rhizoclonium riparium* (7) (Cuadro 2).

Se encontró que en *Bostrychia calliptera* de la zona media, el compuesto más relativamente abundante fue el ácido hexadecanoico, éster etílico (36.2%), seguido del éster bis (2-etilhexílico) del ácido 1,3-bencenodicarboxílico (13.4%), eicosano (13.1%), colesterol (10.6%), octocrileno (10.5%) y el octadecano (8.1%). Por otro lado, en la muestra de zona alta, el éster bis (2-etilhexílico) del ácido 1,3-bencenodicarboxílico (41.5%) fue el más representativo, seguido del 2-metiloctacosano (35.2%), eicosano (6.6%), y el ácido hexadecanoico, éster etílico (6%).

Por su parte, en *Catenella impudica* se identificaron dos compuestos, el eicosano (64.1%) y el 2-metiloctacosano (35.9%). Finalmente, en *Rhizoclonium riparium* el ei-



**Cuadro 1:** Concentración de minerales (mg kg<sup>-1</sup>) en tres especies de macroalgas asociadas a manglares: *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne, *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh y *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey. Los minerales evaluados incluyen potasio (K), azufre (S), hierro (Fe), sodio (Na), magnesio (Mg), calcio (Ca), manganeso (Mn), fósforo (P), cobre (Cu), boro (B) y zinc (Zn).

| Minerales      | <i>B. calliptera</i> (Montagne) Montagne<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>C. impudica</i> (Montagne) J. Agardh<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>R. riparium</i> (Roth) Harvey<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Potasio (K)    | 30,100                                                             | 31,200                                                            | 35,000                                                     |
| Azufre (S)     | 29,400                                                             | 70,600                                                            | 30,000                                                     |
| Hierro (Fe)    | 9180                                                               | 1880                                                              | 6320                                                       |
| Sodio (Na)     | 7450                                                               | 46,700                                                            | 7330                                                       |
| Magnesio (Mg)  | 7960                                                               | 16,600                                                            | 9600                                                       |
| Calcio (Ca)    | 5510                                                               | 6860                                                              | 5010                                                       |
| Manganeso (Mn) | 4730                                                               | 204                                                               | 755                                                        |
| Fósforo (P)    | 1210                                                               | 800                                                               | 1270                                                       |
| Cobre (Cu)     | 73.1                                                               | 20.7                                                              | 22.8                                                       |
| Boro (B)       | 77.7                                                               | 51.2                                                              | 143                                                        |
| Zinc (Zn)      | 50.2                                                               | 26.4                                                              | 28                                                         |

**Cuadro 2:** Compuestos identificados en *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne (zona media (M) y alta (A)), *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh y *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). Se incluye la clase de compuesto, masa molecular (g mol<sup>-1</sup>), tiempo de retención y el porcentaje de área relativo para cada especie (% área).

| Clase      | Compuesto                                                           | Masa molecular<br>(g mol <sup>-1</sup> ) | Tiempo de retención<br>(min) | % Área                                                |                                                       |                                               |                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
|            |                                                                     |                                          |                              | <i>B. calliptera</i><br>(Montagne)<br>Montagne<br>(M) | <i>B. calliptera</i><br>(Montagne)<br>Montagne<br>(A) | <i>C. impudica</i><br>(Montagne) J.<br>Agardh | <i>R. riparium</i><br>(Roth) Harvey |
| Alcano     | Eicosano                                                            | 282.5                                    | 19.5                         | 13.1                                                  | 6.6                                                   | 64.1                                          | 45.2                                |
|            | 2-metiloctacosano                                                   | 408.8                                    | 21.3                         | 4.8                                                   | 35.2                                                  | 35.9                                          | 26.6                                |
|            | Octadecano                                                          | 254.5                                    | 17.6                         | 8.1                                                   |                                                       |                                               | 5.4                                 |
|            | 9-metilnonadecano                                                   | 282.5                                    | 19                           |                                                       | 1.4                                                   |                                               |                                     |
|            | 2-Metileicosano                                                     | 296.6                                    | 19.3                         |                                                       | 2.8                                                   |                                               | 3.6                                 |
|            | 3-Metileicosano                                                     | 310.6                                    | 21.1                         |                                                       | 4.3                                                   |                                               | 3.4                                 |
|            | 2-4-dimetileicosano                                                 | 310.6                                    | 20.9                         |                                                       |                                                       |                                               | 5.5                                 |
|            | Tetracosano                                                         | 338.7                                    | 23                           |                                                       |                                                       |                                               | 10.2                                |
|            | Éster bis(2-<br>etilhexílico) del ácido<br>1,3-benzenodicarboxílico | 390.6                                    | 25.4                         | 13.4                                                  | 41.5                                                  |                                               |                                     |
|            | Ácido octadecanoico, éster<br>etilico                               | 312.5                                    | 21.2                         | 3.3                                                   |                                                       |                                               |                                     |
| Éster      | Ácido hexadecanoico, éster<br>etilico                               | 284.5                                    | 19.3                         | 36.2                                                  | 6                                                     |                                               |                                     |
|            | Ácido hexadecanoico, éster<br>metílico                              | 270.5                                    | 18.7                         |                                                       | 2.2                                                   |                                               |                                     |
|            | Octocrileno                                                         | 361.5                                    | 24.7                         | 10.5                                                  |                                                       |                                               |                                     |
| Esteroides | Colesterol                                                          | 386.7                                    | 27.9                         | 10.6                                                  |                                                       |                                               |                                     |



cosano (45.2%), 2-metiloctacosano (26.6%), tetracosano (10.2%), 2,4-dimetileicosano (5.5%) y el octadecano (5.4%) fueron los compuestos principales. En el **cuadro 2** se detallan las composiciones químicas de las especies estudiadas, incluyendo la clase de compuesto, masa molecular ( $\text{g mol}^{-1}$ ), tiempo de retención y su área (%). Los cromatogramas se muestran en la **figura 3**.

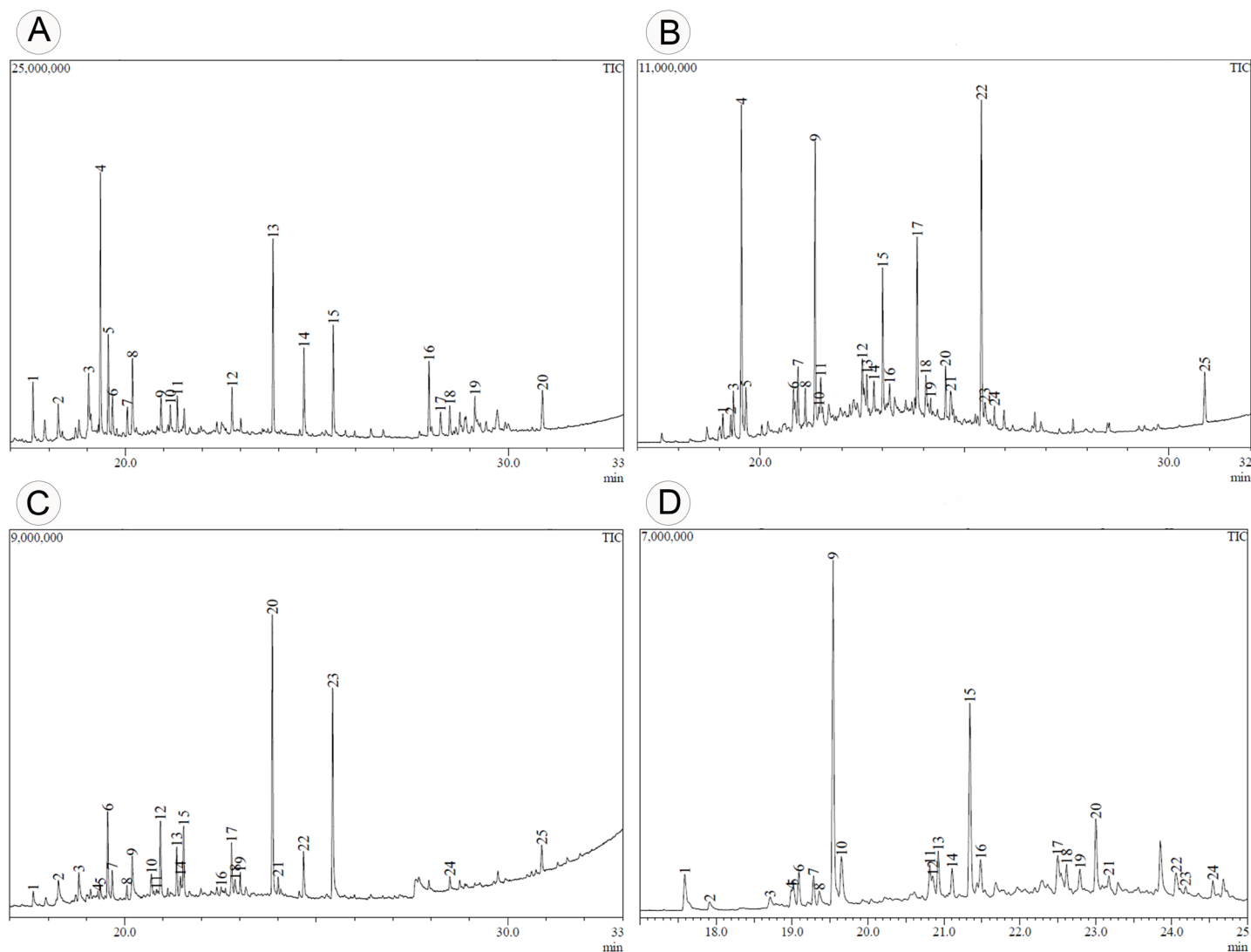
En cuanto a la clase de compuestos identificados, se encontró que, en *Bostrychia calliptera* de la zona media, los ésteres representaron el porcentaje más alto (63.4%), seguido de los alcanos (26%) y esteroides (10.6%) (**Fig. 4**). En comparación, en la muestra de la zona alta, los ésteres

(50.3%) y alcanos (49.7%) estuvieron en cantidades similares. Por su parte, en *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium* solo se identificaron alcanos (**Fig. 4**).

## Discusión

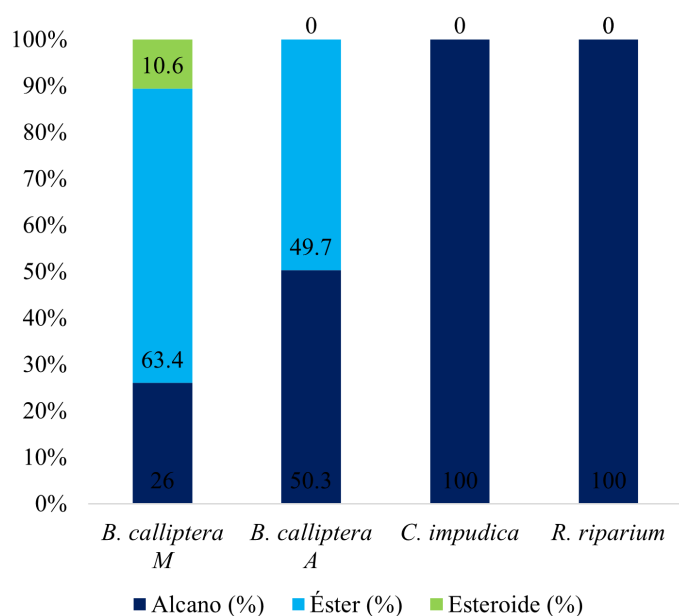
### Análisis nutricional

Los bosques de manglar son uno de los ecosistemas más relevantes en Colombia, debido a los múltiples servicios ecosistémicos que proporcionan (Palacios y Cantera, 2017; Rojas et al., 2019). Sin embargo, la información sobre los organismos asociados a estos ecosistemas sigue siendo limitada. Un reciente estudio sobre metabolitos secundarios



**Figura 3:** Cromatogramas de los compuestos orgánicos obtenidos por GC-MS. A. *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne zona media; B. *Bostrychia calliptera* zona alta (Montagne) Montagne; C. *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh; D. *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey. Cada gráfico presenta picos en diferentes tiempos de retención (eje x), representando diferentes compuestos presentes en una muestra.





**Figura 4:** Composición porcentual de compuestos químicos identificados en *Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne de zona media (M) y alta (A); *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh y *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey. Los compuestos se clasifican en alcanos (azul oscuro), ésteres (azul claro) y esteroides (verde).

de hongos endofíticos del manglar de Buenaventura en el pacífico colombiano destacó el interés por explorar la biota de estos entornos (Vallejo et al., 2024). No obstante, aún son escasas las investigaciones dedicadas a la composición química de las algas marinas de estos ecosistemas (Lenis et al., 2007).

En ese contexto, los resultados de este estudio no solo confirman la importancia de las algas marinas como fuente de compuestos bioactivos, sino que también aportan nueva información sobre su composición química, especialmente en las especies *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium*. La variabilidad observada en su composición proximal es consistente con lo reportado en la literatura, la cual indica que el contenido de proteínas, carbohidratos, fibra, lípidos y minerales puede diferir ampliamente entre las especies de algas marinas (Peñalver et al., 2020; Campos et al., 2022; Narvaez-Izquierdo et al., 2024). Estas diferencias en la composición se atribuyen a factores ambientales o genéticos que influyen en la química de las especies (Peñalver et al., 2020; Ilyas et al., 2023).

En particular, la especie *Rhizoclonium riparium* destacó por su elevado contenido de fibra, alcanzando 30.2% de su peso seco, superando tanto a las demás especies analizadas (Fig. 2), como al promedio estimado para las algas verdes en general (6.58%) (Narvaez-Izquierdo et al., 2024). Además, su porcentaje de cenizas fue de 16.9%, un valor consistente con reportes previos de 15.9% (Chao et al., 1999). En cuanto al contenido de proteínas (19.8%), fue mayor al promedio estimado para las algas verdes en general (15.54%) (Narvaez-Izquierdo et al., 2024). Investigaciones anteriores sugieren que, debido a su morfología fibrilar y su elevado contenido de celulosa, *Rhizoclonium riparium* tiene un potencial uso como sustituto parcial de la fibra de madera utilizada en la producción de papel (Chao et al., 1999; 2000).

Por su parte, *Bostrychia calliptera* presentó los valores más altos de proteínas (25%) y nitrógeno orgánico (4.01%) (Fig. 2). Los porcentajes de proteína son comparables con los estimados para *Gracilaria gracilis* (Stackhouse) Steentoft, L.M.Irvine y Farnham y *Porphyra* sp., dos algas de relevancia en la industria alimentaria, en las que se han registrado contenidos proteicos de hasta 28.8 y 35%, respectivamente (Campos et al., 2022; Nova et al., 2023). En cuanto al nitrógeno orgánico, en algas rojas se estima un valor promedio de 4.09% (Narvaez-Izquierdo et al., 2024).

Adicionalmente, *Catenella impudica* presentó un contenido proteico de 14.6%, el cual es congruente con lo reportado por Banerjee et al. (2009). Estos autores encontraron que en *Catenella repens* el contenido de proteínas varía entre 2.78 y 16.03%, dependiendo de las fluctuaciones estacionales en los bosques de manglar de la India. En dicho estudio, se observó una correlación positiva entre el contenido de proteínas y la concentración de nitrato disuelto, mientras que factores como la temperatura del agua y la salinidad mostraron una correlación negativa. Por otro lado, en *Catenella impudica* se observó el mayor contenido de cenizas (24.9%), seguido por *Bostrychia calliptera* (18.9%) (Fig. 2), similar a lo reportado para algas rojas (Peñalver et al., 2020).

En general, se observaron concentraciones altas y variables de diferentes minerales en las tres especies analizadas. Los elementos más representativos por su concen-



tración fueron el potasio, azufre, hierro, sodio, magnesio, calcio, fósforo y manganeso. El cobre, boro y zinc también estuvieron presentes en todas las especies, pero en cantidades menores (Cuadro 1). Estos minerales son esenciales para el funcionamiento de los procesos metabólicos y se presentan en bajas concentraciones (Wan et al., 2019).

Se incluye el cuadro 3 con el fin de comparar la composición elemental de *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium* con los valores reportados en otras especies de importancia económica. Este cuadro incluye la composición elemental reportada para *Gracilaria* spp. (Wen et al., 2006; Neto et al., 2018; Torres et al., 2019; Nova et al., 2023), *Sargassum naozhouense* C.K.Tseng y Lu Baoren (Peng et al., 2013) y *Ascophyllum* spp. (MacArtain et al., 2007; Lorenzo et al., 2017). *Sargassum* spp. y *Ascophyllum* spp. se utilizan principalmente como biofertilizantes y se ha encontrado que su aplicación en el suelo mejora la composición orgánica y estimula el crecimiento de las plantas (Shukla et al., 2019; Thompson et al., 2020).

Se ha encontrado que las macroalgas tienen una notable capacidad para acumular concentraciones elevadas de macroelementos directamente de su entorno, como el sodio, magnesio, fósforo, calcio y potasio, así como oligoelementos, incluyendo el manganeso, hierro, cobalto, níquel, zinc y selenio (Wan et al., 2019). La tasa de acumulación de estos minerales puede variar dependiendo de la tasa de crecimiento, la edad del alga y factores abióticos como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la intensidad de la luz y la salinidad (Banerjee et al., 2009; Wan et al., 2019).

En cuanto a la composición elemental de las especies analizadas, no se han publicado estudios previos que detallen los perfiles de *Bostrychia calliptera* y *Catenella impudica*. No obstante, para *Rhizoclonium riparium*, Afonso et al. (2018) encontraron niveles de yodo ( $281.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), estroncio ( $141.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ), manganeso ( $135.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), cobre ( $68.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y zinc ( $59.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En contraste, nuestras mediciones revelaron una mayor concentración de manganeso ( $755 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que las concentraciones de cobre ( $22.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y zinc ( $28 \text{ mg kg}^{-1}$ ) fueron similares a las reportadas en dicho estudio (Cuadro 1). Además, las concentraciones de estos elementos en *Rhizoclonium ripa-*

*rium* fueron superiores a las registradas en *Gracilaria* spp., *Sargassum naozhouense* y *Ascophyllum* spp., excepto en el caso del zinc, cuya concentración en estas especies comerciales no ha sido reportada, al igual que la del boro (Cuadro 3).

En el caso de *Catenella impudica*, se detectaron los valores más altos de azufre ( $70,600 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sodio ( $46,700 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y magnesio ( $16,600 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Cuadro 1). Los ecosistemas marinos, como los manglares, suelen ser reservorios de azufre (Sherman et al., 1998). Este elemento se encuentra presente en las algas en forma de compuestos como proteínas, péptidos, aminoácidos, polisacáridos, etc. (Giordano et al., 2008). El contenido de azufre en *Catenella impudica* es notablemente superior al registrado en *Sargassum naozhouense* ( $1470 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y *Gracilaria* spp. ( $260.9\text{-}1650 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Asimismo, el contenido de sodio en *Catenella impudica* fue mayor al de *Ascophyllum* spp. ( $2250\text{-}8678.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y al de *Gracilaria* spp. ( $4020 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Finalmente, los niveles de potasio ( $30,100\text{-}35,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), en particular, fueron comparables a los reportadas en *Sargassum naozhouense* ( $41,700 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y *Ascophyllum* spp. ( $37,813.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Cuadro 3). Este elemento, junto con el nitrógeno y fósforo son fundamentales para el crecimiento de las plantas (Shukla et al., 2019). La presencia de potasio en niveles relativamente altos, junto con las concentraciones de calcio ( $5010\text{-}6860 \text{ mg kg}^{-1}$ ), fósforo ( $800\text{-}1270 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y nitrógeno ( $2.38\text{-}4.01\%$ ), sugiere un potencial uso de *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium* como biofertilizantes. No obstante, dado que la biomasa de las poblaciones naturales de estas especies en las áreas de estudio es relativamente baja y se encuentran asociadas específicamente a las raíces del mangle (Peña-Salamanca, 2008), su aprovechamiento sostenible requerirá el desarrollo de sistemas de cultivo que incrementen su biomasa a nivel comercial.

### Compuestos identificados por GC-MS

El método de cromatografía de gases acoplado a espectroscopia de masas (GC-MS) ha sido ampliamente utilizado para el análisis de metabolitos volátiles de algas marinas (Park et al., 2023). Por ejemplo, de Felício et al. (2010) aplicaron esta técnica en el análisis de *Bostrychia tenella*, identificando alcanos, ésteres y derivados del colesterol, lo



**Cuadro 3:** Concentración de minerales (mg kg<sup>-1</sup>) de tres macroalgas asociadas a manglares (*Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne, *Catenella impudica* (Montagne) J. Agardh y *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey) en comparación con especies de algas marinas de importancia comercial (*Gracilaria* spp., *Sargassum naozhouense* C.K.Tseng & Lu Baoren y *Ascophyllum* spp.). Los minerales evaluados incluyen potasio (K), azufre (S), hierro (Fe), sodio (Na), magnesio (Mg), calcio (Ca), manganeso (Mn), fósforo (P), cobre (Cu), boro (B) y zinc (Zn). Información tomada de Wen et al., 2006; MacArtain et al., 2007; Peng et al., 2013; Lorenzo et al., 2017; Neto et al., 2018; Torres et al., 2019; Thompson et al., 2020; Nova et al., 2023.

| Minerales      | <i>B. calliptera</i><br>(Montagne)<br>Montagne<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>C. impudica</i><br>(Montagne) J.<br>Agardh<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>R. riparium</i> (Roth)<br>Harvey<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>Gracilaria</i> spp.<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>S. naozhouense</i><br>C.K.Tseng & Lu<br>Baoren<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | <i>Ascophyllum</i> spp.<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Potasio (K)    | 30,100                                                                   | 31,200                                                                  | 35,000                                                        | 89,200-92,431                                    | 41,700                                                                      | 7650-37,813.5                                     |
| Azufre (S)     | 29,400                                                                   | 70,600                                                                  | 30,000                                                        | 260.9-1650                                       | 1470                                                                        | 133.4-149                                         |
| Hierro (Fe)    | 9180                                                                     | 1880                                                                    | 6320                                                          | 26,130-159,470                                   | 32,500                                                                      | 11,738-45,757.1                                   |
| Sodio (Na)     | 7450                                                                     | 46,700                                                                  | 7330                                                          | 4020                                             | -                                                                           | 2250-8678.2                                       |
| Magnesio (Mg)  | 7960                                                                     | 16,600                                                                  | 9600                                                          | 1391.3-6240                                      | 669.8                                                                       | 5750-9847.3                                       |
| Calcio (Ca)    | 5510                                                                     | 6860                                                                    | 5010                                                          | 67-240                                           | 58.4                                                                        | 19.6                                              |
| Manganeso (Mn) | 4730                                                                     | 204                                                                     | 755                                                           | 1899.7-4150                                      | 1200                                                                        | -                                                 |
| Fósforo (P)    | 1210                                                                     | 800                                                                     | 1270                                                          | 26-32.7                                          | 3.6                                                                         | 80                                                |
| Cobre (Cu)     | 73.1                                                                     | 20.7                                                                    | 22.8                                                          | 32.7-64.2                                        | 90.8                                                                        | -                                                 |
| Boro (B)       | 77.7                                                                     | 51.2                                                                    | 143                                                           | -                                                | -                                                                           | -                                                 |
| Zinc (Zn)      | 50.2                                                                     | 26.4                                                                    | 28                                                            | -                                                | -                                                                           | -                                                 |

cual es coherente con el tipo de compuestos encontrados en *Bostrychia calliptera* en el presente estudio (Fig. 4). En esta especie, se identificaron compuestos específicos de la zona media y alta del manglar, aunque con variaciones en sus concentraciones. Entre ellos, se encontraron ésteres lipídicos como el éster bis(2-etilhexílico) del ácido 1,3-benzenodicarboxílico (13.4 y 41.5% en la zona media y alta, respectivamente) y el ácido hexadecanoico, éster etílico (36.2 y 6% en la zona media y alta, respectivamente) (Cuadro 2). Este tipo de lípidos se forman por esterificación de ácidos grasos con alcoholes (Guschina y Harwood, 2009). Además, se detectaron compuestos exclusivos de cada zona. En la zona media, se encontraron el octocrileno (10.5%), el ácido octadecanoico, éster etílico (3.3%) y el colesterol (10.6%). El colesterol es el principal esteroles en algas rojas, aunque su concentración varía entre las distintas familias (Kumari et al., 2013; Hannan et al., 2020). Por su parte, en la zona alta, se identificaron el ácido hexadecanoico, éster metílico (2.2%) y el 9-metilnonadecano (1.4%).

Una posible explicación para las diferencias en las concentraciones de los ésteres lipídicos observadas en *Bostrychia calliptera* entre la zona media y alta, es que, en

organismos fotosintéticos, la composición de lípidos puede verse afectada por factores ambientales como la intensidad de luz, temperatura, pH, salinidad y disponibilidad de nutrientes (Guschina y Harwood, 2009). Por ejemplo, De Jong et al. (2021) examinaron el impacto combinado de la intensidad lumínica y la disponibilidad de nutrientes en el contenido de esteroides de *Saccharina latissima* (L.) C.E.Lane, C.Mayes, Druehl y G.W. Saunders, observando un aumento en las concentraciones con el incremento de irradiancia bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes. Por su parte, Toth et al. (2020) analizaron la composición de ácidos grasos en *Ulva fenestrata* Postels y Ruprecht bajo diferentes niveles de irradiancia, temperatura, nutrientes y pCO<sub>2</sub>, encontrando una mayor concentración de estos compuestos bajo condiciones de baja irradiancia y alta concentración de nutrientes, especialmente de nitrato.

La información reportada sobre los cambios en las concentraciones de metabolitos en macroalgas asociadas a manglares es escasa y se ha enfocado en la respuesta adaptativa de estas al estrés salinidad, temperatura, luz y pH (Borburema et al., 2022, 2024; Orfanoudaki et al., 2020; Urrea-Victoria et al., 2023). El estudio de Peña-Salamanca



(2017) reportó variaciones en las tasas fotosintéticas y metabólicas de las especies del complejo *Bostrychium* según su distribución vertical en los manglares. De igual forma, Banerjee et al. (2009) encontraron que la concentración de astaxantina en *Catenella repens* está influenciada por las condiciones del manglar donde habita.

Por otro lado, cabe mencionar que el ácido hexadecanoico, éster metílico (2.2%) y el 9-metilnonadecano (1.4%), identificados en *Bostrychia calliptera* son conocidos por sus actividades biológicas. El ácido hexadecanoico, éster metílico ha demostrado propiedades antiinflamatorias, antiartríticas y anticancerígenas (Abdel-Jaleel et al., 2021; Breeta et al., 2021; Olowofolahan et al., 2021), mientras que el 9-metil nonadecano ha mostrado actividad antibacteriana (Mehboudi et al., 2023). Diferentes actividades biológicas han sido estudiadas previamente en especies de *Bostrychia*, entre ellas la actividad antioxidante, antiparasítica, antifúngica y antiviral (Duarte et al., 2001; de Felício et al., 2010; Martins et al., 2013). En *Rhizoclonium riparium*, se detectaron dos compuestos únicos de sus extractos, el 2,4-dimetileicosano (5.5%) y el tetracosano (10.2%). Este último ha sido evaluado previamente por su actividad citotóxica significativa contra células de cáncer de colon (Uddin et al., 2012). Los polisacáridos solubles extraídos de *Rhizoclonium riparium* también han demostrado propiedades inmunológicas, como la estimulación de la expresión del gen IL-1 en macrófagos murinos (Hsu et al., 2006).

Los compuestos que estuvieron presentes en todas las especies fueron el eicosano, 2-metiloctacosano, 2-metileicosano y el 3-metileicosano. De estos, el eicosano fue el más abundante en *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium*. Este compuesto ha sido evaluado previamente por su actividad antioxidante (Beema Shafreen et al., 2022; Balachandran et al., 2023; Bhat et al., 2024). Finalmente, todos los extractos algales contenían alcaloides, esteroides, terpenos, glicósidos cardiotónicos y saponinas. Estos compuestos son conocidos por sus propiedades y beneficios para la salud humana y sus aplicaciones industriales en los sectores farmacéutico, alimentario, cosmético y agrícola (Park et al., 2023).

El presente estudio constituye un avance significativo en la caracterización fitoquímica de las algas marinas asociadas a los manglares, pero presenta algunas limitacio-

nes. Una de ellas es que la técnica de GC-MS, aunque adecuada para la identificación de compuestos volátiles y térmicamente estables, no permite la detección completa de todos los metabolitos presentes en estas especies (Park et al., 2023). En este sentido, futuras investigaciones podrían enfocarse en la aplicación de técnicas como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS), que ofrece un espectro más amplio para la identificación de compuestos bioactivos (Park et al., 2023).

## Conclusiones

Este estudio amplía el conocimiento sobre la composición nutricional y fitoquímica de las algas asociadas a los ecosistemas de manglar, destacando el valor de especies como *Bostrychia calliptera*, *Catenella impudica* y *Rhizoclonium riparium* como fuentes potenciales de compuestos bioactivos. Los resultados confirman que estas especies presentan una composición nutricional variada, con diferencias en proteínas, fibras, minerales y metabolitos secundarios. En particular, *Rhizoclonium riparium* destacó por su alto contenido de fibra y minerales esenciales, mientras que *Bostrychia calliptera* presentó una elevada concentración de proteínas y compuestos bioactivos de interés farmacéutico y nutricional. Además, el contenido mineral de estas algas, especialmente de potasio, azufre, fósforo y nitrógeno, sugiere su posible utilización como biofertilizantes. Los análisis mediante GC-MS revelaron la presencia de diversos compuestos bioactivos en todas las especies, incluyendo ácidos grasos, esteroides y alcanos, con potenciales aplicaciones en las industrias farmacéutica y cosmética. Sin embargo, se reconocen las limitaciones de este estudio, ya que la técnica de GC-MS no permite una identificación exhaustiva de todos los metabolitos presentes. Por ello, se recomienda incorporar técnicas más avanzadas en investigaciones futuras, para lograr un análisis más detallado de los compuestos bioactivos.

## Contribución de autores

EJPS diseñó el proyecto y obtuvo la financiación. EJPS y ACZL llevaron a cabo el muestreo. Todos los autores contribuyeron a las pruebas fitoquímicas y nutricionales, así como a la adquisición de datos y al análisis bioinformático. Todos los autores participaron en la interpretación de los



resultados. EJPS y ACZL redactaron el manuscrito, contribuyeron a su revisión y aprobaron la versión final.

## Financiamiento

Este estudio fue financiado por el proyecto “Investigación para el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad de los microorganismos asociados al ecosistema de manglar y la exploración de su potencial biotecnológico en la costa pacífica del Valle del Cauca” con el código BPIN 2021000100488, de la convocatoria del Ministerio de Ciencias, Tecnologías e Innovación de Colombia 18-1-PLAN BIENAL SGR 2021-2022.

## Agradecimientos

Agradecemos al personal del Laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Biología, así como al equipo del Laboratorio del Grupo de Investigación en Productos Naturales y Alimentos (GIPNA) del Departamento de Química (Universidad del Valle), por el valioso apoyo y las facilidades brindadas para la realización de los experimentos. A Gerson Dirceu López del Departamento de Química por su orientación en el análisis de GC-MS.

## Declaración de disponibilidad de datos

El conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio fue sometido en SciELO Data y puede ser accedido en <https://doi.org/10.48331/scielodata.SUSUET>

## Literatura citada

- Abdel Jaleel, G. A., S. S. Azab, W. M. El-Bakly y A. Hassan. 2021. Methyl palmitate attenuates adjuvant induced arthritis in rats by decrease of CD68 synovial macrophages. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 137: 111347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111347>
- Abdu, M., M. G. Saad y H. M. Shafik. 2019. Phytochemical screening and antimicrobial activities of some green algae from Egypt. *Journal of Medicinal Plants Studies* 7(3): 12-16.
- Afonso, C., C. Cardoso, A. Ripol, J. Varela, H. Quental-Ferreira, P. Pousão-Ferreira, M. S. Ventura, I. M. Delgado, I. Coelho, I. Castanheira y N. M. Bandarra. 2018. Composition and bioaccessibility of elements in green seaweeds from fishpond aquaculture. *Food Research International* 105: 271-277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.015>
- AOAC. 2006. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18th ed. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, USA.
- Aron Santhosh Kumar, Y., M. Palanisamy y N. Savithra. 2024. Bio profiling of brackish water alga *Gracilaria tenuistipitata* C.F. Chang & B.-M.Xia - an indigenous species from Andhra Pradesh, East Coast, India. *Marine Biology Research* 20(3-4): 59-74. DOI: <https://doi.org/10.1080/17451000.2023.2299975>
- Balachandran, A., S. B. Choi, M.-M. Beata, J. Małgorzata, G. R. A. Froemming, C. A. Lavilla Jr., M. P. Billacura, S. N. Siyumbwa y P. N. Okechukwu. 2023. Antioxidant, Wound Healing Potential and In Silico Assessment of Naringin, Eicosane and Octacosane. *Molecules* 28(3): 1043. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28031043>
- Banerjee, K., R. Ghosh, S. Homechaudhuri y A. Mitra. 2009. Seasonal variation in the biochemical composition of red seaweed (*Catenella Repens*) from Gangetic Delta, Northeast Coast of India. *Journal of Earth System Science* 118(5): 497-505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-009-0045-2>
- Beema-Shafreen, R. M., S. Seema, S. A. Lakshmi, A. Srivathsan, K. Tamilmuhilan, A. Shrestha, B. Balasubramanian, R. Dhandapani, R. Paramasivam, S. Al Obaid, S. H. Salmen, M. F. Mohd Amin y S. Muthupandian. 2022. In Vitro and In Vivo Antibiofilm Potential of Eicosane Against *Candida albicans*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 194(10): 4800-4816. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03984-8>
- Bhat, M. P., R. S. Kumar, B. Chakraborty, S. K. Nagaraja, K. G. Babu y S. Nayaka. 2024. Eicosane: An antifungal compound derived from *Streptomyces* sp. KF15 exhibits inhibitory potential against major phytopathogenic fungi of crops. *Environmental Research* 251(Pt 1): 118666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118666>
- Borburema, H. D. S., R. P. De Lima y G. E. C. De Miranda. 2020. Effects of ocean warming, eutrophication and salinity variations on the growth of habitat-forming macroalgae in estuarine environments. *Acta Botanica Brasilica* 34(4): 662-672. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0303>
- Borburema, H. D. S., A. Graiff, E. Marinho-Soriano y U. Karsten. 2022. Photosynthetic performance, growth, pigment content, and photoprotective compounds of the mangrove macroalgae *Bostrychia calliptera* and *Bostrychia montagnei*



- (Rhodophyta) under light stress. *Frontiers in Marine Science* 9: 989454. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.989454>
- Borburema, H. D. S., U. Karsten, N. Plag, N. S. Yokoya y E. Marinho-Soriano. 2024. Low molecular weight carbohydrate patterns of mangrove macroalgae from different climatic niches under ocean acidification, warming and salinity variation. *Marine Environmental Research* 194: 106316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.MARENVRES.2023.106316>
- Breeta, R. D. I. E., V. M. B. Grace y D. D. Wilson. 2021. Methyl Palmitate-A suitable adjuvant for Sorafenib therapy to reduce in vivo toxicity and to enhance anti-cancer effects on hepatocellular carcinoma cells. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology* 128(3): 366-378. DOI: <https://doi.org/10.1111/BCPT.13525>
- Campos, B. M., E. Ramalho, I. Marmelo, J. P. Noronha, M. Malfeito-Ferreira, M., P. Mata y M. S. Diniz. 2022. Proximate Composition, Physicochemical and Microbiological Characterization of Edible Seaweeds Available in the Portuguese Market. *Frontiers in Bioscience* 14(4): 26. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.fbe1404026>
- Chankaew, W., D. Amornlerdpison y N. Lailerd. 2021. Characteristics of red macroalgae, *Caloglossa beccarii* DeToni from freshwater for food as safe and other applications in Thailand. *International Journal of Agricultural Technology* 17(1): 1-12.
- Chankaew, W., W. Luella y S. Phromhom. 2016. Diversity and Screening of Biological Activity of Red Macroalgae from Trang Watershed Area, Thailand. *International Journal of Agricultural Technology* 12(7): 2113-2122.
- Chao, K.P., S. Y. Su y C. S. Chen. 1999. Chemical composition and potential for utilization of the marine alga *Rhizoclonium* sp. *Journal of Applied Phycology* 11(6): 525-533. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008142609914>
- Chao, K.-P., Y. C. Su y C. S. 2000. Feasibility of Utilizing *Rhizoclonium* in Pulping and Papermaking. *Journal of Applied Phycology* 12: 53-62. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008166815023>
- Čmiková, N., L. Galovičová, M. Miškeje, P. Borotová, M. Kluz y M. Kačániová. 2022. Determination of antioxidant, antimicrobial activity, heavy metals and elements content of seaweed extracts. *Plants* 11(11): 1493. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11111493>
- de Felício, R., S. de Albuquerque., M. C. M. Young., N. S. Yokoya y H. M. Deboni. 2010. Trypanocidal, leishmanicidal and antifungal potential from marine red alga *Bostrychia tenella* J. Agardh (Rhodomelaceae, Ceramiales). *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 52(5): 763-769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2010.02.018>
- De Jong, D. L. C., K. R. Timmermans, J. M. de Winter y G. C. H. Derksen. 2021. Effects of nutrient availability and light intensity on the sterol content of *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology* 33: 1101-1113. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02359-y>
- Duarte, M. E. R., D. G. Nosedá, M. D. Nosedá, S. Tulio, C. A. Pujol y E. B. Damonte. 2001. Inhibitory effect of sulfated galactans from the marine alga *Bostrychia montagnei* on herpes simplex virus replication in vitro. *Phytomedicine* 8(1): 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1078/0944-7113-00007>
- Erlania, A. B., P. L. Macreadie, M. A. Young, O. J. Holland, Z. Clark, D. Ierodiaconou, R. C. Carvalho, D. Kennedy y A. D. Miller. 2023. Patterns and drivers of macroalgal 'blue carbon' transport and deposition in near-shore coastal environments. *Science of The Total Environment* 890: 164430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2023.164430>
- FAO. 2018. The Global Status of Seaweed Production, Trade and Utilization. Roma, Italia.
- García-Granados, R. U., F. Cruz-Sosa, F. J. Alarcón-Aguilar, A. Nieto-Trujillo y M. E. Gallegos-Martínez. 2019. Análisis fitoquímico cualitativo de los extractos acuosos de *Thalassia testudinum* Banks ex Köning et Sims de la localidad de Champotón, Campeche, México, durante el ciclo anual 2016-2017. *Polibotánica* 48(24): 151-168. DOI: <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.48.12>
- Giordano, M., A. Norici y S. Ratti. 2008. Role of Sulfur for Algae: Acquisition, Metabolism, Ecology and Evolution. In: Hell, R., C. Dahl, D. Knaff y T. Leustek (eds.). *Sulfur Metabolism in Phototrophic Organisms*. Advances in Photosynthesis and Respiration, 1st ed. Vol. 27. Springer. Dordrecht, Países Bajos. Pp. 397-415. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6863-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6863-8_20)
- Guschina, I. y J. L. Harwood. 2009. Algal lipids and effect of the environment on their biochemistry. In: Kainz, M., M. Brett y M. Arts (eds.). *Lipids in Aquatic Ecosystems*. Springer. New York, EUA. Pp 1-24. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-89366-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-89366-2_1)
- Gyi, K. K. y U. S. Htun. 2013. Systematics of the genus *Bostrychia* Montagne from Setse and Kyaikkhami I: *B. radicans*



- Montagne (Montagne) based on the morphology and development of sporelings in culture. *Universities Research Journal* 6(1): 1-22.
- Hannan, Md. A., A. A. M. Sohag R. Dash, Md. N. Haque, Md. Mohibullah, D. F. Oktaviani, Md. T. Hossain, H. J. Choi e I. S. Moon. 2020. Phytosterols of marine algae: Insights into the potential health benefits and molecular pharmacology. *Phytomedicine* 69: 153201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2020.153201>
- Hsu, H.Y., K. F. Hua, Y. C. Su, L. C. Chu, S. C. Su, H. W. Chiu., C. H. Wong, S. T. Chen, C. W. Shieh, S. S. Yang, Y. M. Chen y L. K. Chao. 2006. Alkali-soluble polysaccharides of *Rhizoclonium riparium* alga induce IL-1 gene expression via protein kinase signaling pathways. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(10): 3558-3565. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf060442f>
- Ilyas, Z., A. Ali Redha, Y. S. Wu, F. Z. Ozeer y R. E. Aluko. 2023. Nutritional and Health Benefits of the Brown Seaweed *Himanthalia elongata*. *Plant Foods for Human Nutrition* 78(2): 233. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11130-023-01056-8>
- Kumari, P., A. J. Bijo, V. A. Mantri, C. R. K. Reddy y B. Jha. 2013. Fatty acid profiling of tropical marine macroalgae: An analysis from chemotaxonomic and nutritional perspectives. *Phytochemistry* 86: 44-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2012.10.015>
- Lenis, L. A., R. Benítez., E. Peña Salamancay y D. M. Chito Trujillo. 2007. Extracción, separación y elucidación estructural de dos metabolitos secundarios del alga marina *Bostrychia calliptera*. *Scientia Et Technica* 13(33): 97-102.
- Linstrom, P. J. y W. G. Mallard. 2001. The NIST Chemistry WebBook: A chemical data resource on the Internet. *Journal of Chemical and Engineering Data* 46(5): 1059-1063. DOI: <https://doi.org/10.1021/je000236i>
- Lorenzo, J. M., R. Agregán, P. E. S. Munekata, D. Franco, J. Carballo, S. Şahin, R. Lacombe y F. J. Barba. 2017. Proximate composition and nutritional value of three macroalgae: *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *Bifurcaria bifurcata*. *Marine Drugs* 15(11): 360. DOI: <https://doi.org/10.3390/md15110360>
- MacArtain, P., C. I. R. Gill, M. Brooks, R. Campbell e I. R. Rowland. 2007. Nutritional value of edible seaweeds. *Nutrition Reviews* 65(12 Pt 1): 535-543. DOI: <https://doi.org/10.1301/nr.2007.dec.535-543>
- Martins, C. D. L., F. Ramlov, N. P. Nocchi Carneiro, L. M. Gestinari, B. F. dos Santos, L. M. Bento, C. Lhullier, L. Gouvea, E. Bastos, P. A. Horta y A. R. Soares. 2013. Antioxidant properties and total phenolic contents of some tropical seaweeds of the Brazilian coast. *Journal of Applied Phycology* 25(4): 1179-1187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9918-x>
- Mehboudi, N., H. R. Rahimi, H. A. Bakhtiari, M. Alimardani y A. Jalili. 2023. The impact of probiotic cell-free metabolites in MDR *Pseudomonas aeruginosa*: antibacterial properties and effect on antibiotic resistance genes expression. *Letters in Applied Microbiology* 76(10): ovad111. DOI: <https://doi.org/10.1093/LAMBIO/OVAD111>
- Morais, T., A. Inácio, T. Coutinho, M. Ministro, J. Cotas, L. Pereira y K. Bahcevandziev. 2020. Seaweed Potential in the Animal Feed: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(8): 559. DOI: <https://doi.org/10.3390/JMSE8080559>
- Mubashrah, M., M. Arshad, Q. Rahmatullah, M. Sidra y M. Mehmooda. 2020. Preliminary phytochemical screening, proximate analysis, antioxidant and antibacterial activities of an algal species of *Hydrodictyon reticulatum*. *Journal of Bioresource Management* 7(4): 1-26. DOI: <https://doi.org/10.35691/JBM.0202.0147>
- Murillo-Muñoz, M. y E. J. Peña-Salamanca. 2014. Algas Marinas Bentónicas de La Isla Gorgona, Costa Pacífica Colombiana. *Revista de Biología Tropical* 62(suppl.1): 27-41.
- Narvaez-Izquierdo, J., J. Fonseca-De La Hoz, G. Kannan y J. Bohorquez-Herrera. 2024. Use of macroalgae as a nutritional supplement for sustainable production of ruminants: A systematic review and an insight on the Colombian Caribbean region. *Algal Research* 77: 103359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103359>
- Neto, R.T., C. Marçal, A. S. Queirós, H. Abreu, A. M. S. Silva y S. M. Cardoso. 2018. Screening of *Ulva rigida*, *Gracilaria* sp., *Fucus vesiculosus* and *Saccharina latissima* as functional ingredients. *International Journal of Molecular Sciences* 19(10): 2987. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19102987>
- Nova, P., A. Pimenta-Martins, E. Maricato, C. Nunes, H. Abreu, M. A. Coimbra, A. C. Freitas y A. M. Gomes. 2023. Chemical Composition and Antioxidant Potential of Five Algae Cultivated in Fully Controlled Closed Systems.



- Molecules 28(12): 4588. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28124588>
- Olowofolahan, A. O., O. T. Oyeboade y O. O. Olorunsogo. 2021. Methyl palmitate reversed estradiol benzoate-induced endometrial hyperplasia in female rats. *Toxicology Mechanisms and Methods* 31(1): 43-52. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376516.2020.1827329>
- Orfanoudaki, M., M. Alilou, A. Hartmann, J. Mayr, U. Karsten, H. Nguyen-Ngoc y M. Ganzera. 2023. Isolation and structure elucidation of novel mycosporine-like amino acids from the two intertidal red macroalgae *Bostrychia scorpioides* and *Catenella caespitosa*. *Marine Drugs* 21(10): 543. DOI: <https://doi.org/10.3390/MD21100543>
- Orfanoudaki, M., A. Hartmann, H. N. Ngoc, T. Gelbrich, J. West, U. Karsten y M. Ganzera. 2020. Mycosporine-like amino acids, brominated and sulphated phenols: Suitable chemotaxonomic markers for the reassessment of classification of *Bostrychia calliptera* (Ceramiales, Rhodophyta). *Phytochemistry* 174: 112344. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2020.112344>
- Ortega, A., N. R. Geraldi y C. M. Duarte. 2020. Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to Blue Carbon sediments. *Limnology and Oceanography* 65(12): 3139-3149. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.11579>
- Palacios, M. L. y J. R. Cantera. 2017. Uso de madera de manglar como servicio ecosistémico en el Pacífico colombiano. *Hidrobiología* 803: 345-358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3309-x>
- Park, E., H. Yu, J. H. Lim, J. Hee Choi, K. J. Park y J. Lee. 2023. Seaweed metabolomics: A review on its nutrients, bioactive compounds and changes in climate change. *Food Research International* 163: 112221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112221>
- Peña-Salamanca, E. J. 2008. Dinámica especial y temporal de la biomasa algal asociada a las raíces de mangle en la Bahía de Buenaventura, Costa Pacífica de Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 37(2): 55-70.
- Peña-Salamanca, E. J. 2017. El complejo *Bostrychietum*: la flora de algas asociadas a las raíces del manglar en la costa pacífica colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 41(160): 338-348. DOI: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.485>
- Peñalver, R., J. M. Lorenzo, G. Ros, R. Amarowicz, M. Pateiro y G. Nieto. 2020. Seaweeds as a Functional Ingredient for a Healthy Diet. *Marine Drugs* 18(6): 301. DOI: <https://doi.org/10.3390/MD18060301>
- Peng, Y., E. Xie, K. Zheng, M. Fredimoses, X. Yang, X. Zhou, Y. Wang, B. Yang, X. Lin, J. Liu y Y. Liu. 2013. Nutritional and chemical composition and antiviral activity of cultivated seaweed *sargassum naozhouense* Tseng et Lu. *Marine Drugs* 11(1): 20-32. DOI: <https://doi.org/10.3390/md11010020>
- Regina Hershey, N., S. B. Nandan, P. T. Schwing y K. N. Vasu. 2021. Carbon and nitrogen dynamics in a tropical mangrove along the southwestern coast of India. *Marine Ecology* 42(5): e12676. DOI: <https://doi.org/10.1111/MAEC.12676>
- Rios-Marin, F., E. J. Peña Salamanca y R. Benítez Benítez. 2021. Efecto del pH en las tasas de bioacumulación de metales pesados en la macroalga *Bostrychia calliptera* (Rhodomelaceae, Ceramiales). *Acta Biológica Colombiana* 26(2): 226-234. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v26n2.84142>
- Rojas, A. M., C. A. Ruiz-Agudelo, M. C. Diazgranados, H. Polanco y R. Anderson. 2019. Approach to an integral valuation of mangrove's ecosystem services in a marine protected area. Colombian Pacific region. *Journal of Environmental Economics and Policy* 8(3): 322-342. DOI: <https://doi.org/10.1080/21606544.2019.1584127>
- Salgado, H. M. y E. J. Peña-Salamanca. 2016. Macroalgas Bénticas de La Bahía de Tumaco, Pacífico Colombiano. *Hidrobiológica* 26(2): 299-309.
- Sherman, R. E., T. J. Fahey y R. W. Howarth. 1998. Soil-plant interactions in a neotropical mangrove forest: iron, phosphorus and sulfur dynamics. *Oecologia* 115(4): 553-563. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420050553>
- Shukla, P. S., E. G. Mantin, M. Adil, S. Bajpai, A. T. Critchley y B. Prithiviraj. 2019. *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science* 10: 655. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
- Silva, P. I., G. Martínez, M. Martínez y G. Quiñones. 2020. Análisis fitoquímico y evaluación de la actividad antioxidante y antifúngica de *Asphodellus fistulosus* L. *Investigación Científica* 14(2): 120-130.



- Thompson, T. M., B. R. Young y S. Baroutian. 2020. Pelagic *Sargassum* for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118: 109564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109564>
- Torres, P., A. Nagai, D. I. A. Teixeira, E. Marinho-Soriano, F. Chow y D. Y. A. dos Santos. 2019. Brazilian native species of *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta) as a source of valuable compounds and as nutritional supplements. *Journal of Applied Phycology* 31(5): 3163-3173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01804-x>
- Toth, G. B., H. Harrysson, N. Wahlström, J. Olsson, A. Oerbekke, S. Steinhagen, A. Kinnby, J. White, E. Albers, U. Edlund, I. Undeland y H. Pavia. 2020. Effects of irradiance, temperature, nutrients, and  $p\text{CO}_2$  on the growth and biochemical composition of cultivated *Ulva fenestrata*. *Journal of Applied Phycology* 32: 3243-3254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02155-8>
- Uddin, S. J., D. Grice y E. Tiralongo. 2012. Evaluation of cytotoxic activity of patriscabratine, tetracosane and various flavonoids isolated from the Bangladeshi medicinal plant *Acrostichum aureum*. *Pharmaceutical Biology* 50(10): 1276-1280. DOI: <https://doi.org/10.3109/13880209.2012.673628>
- Urrea-Victoria, V., V. Galdes, E. Pinto y L. Castellanos. 2023. Photosynthetic pigments and photoprotective metabolites of Colombian pacific marine macroalgae in response to contrasting ultraviolet-index periods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 564: 151908. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2023.151908>
- Vallejo, S. V., A. M. Rojas, R. Linnakoski y J. A. Osorio. 2024. Chemical analysis of endophytic fungi isolated from mangrove trees in Playa San Pedro Nature Reserve, Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia. *Caldasia* 46(1): 33-44. DOI: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v46n1.97134>
- Wan, A. H. L., S. J. Davies, A. Soler-Vila, R. Fitzgerald y M. P. Johnson. 2019. Macroalgae as a sustainable aquafeed ingredient. *Reviews in Aquaculture* 11(3): 458-492. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12241>
- Wen, X., C. Peng, H. Zhou, Z. Lin, G. Lin, S. Chen y P. Li. 2006. Nutritional composition and assessment of *Gracilaria lemaneiformis* Bory. *Journal of Integrative Plant Biology* 48(9): 1047-1053. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2006.00333.x>

