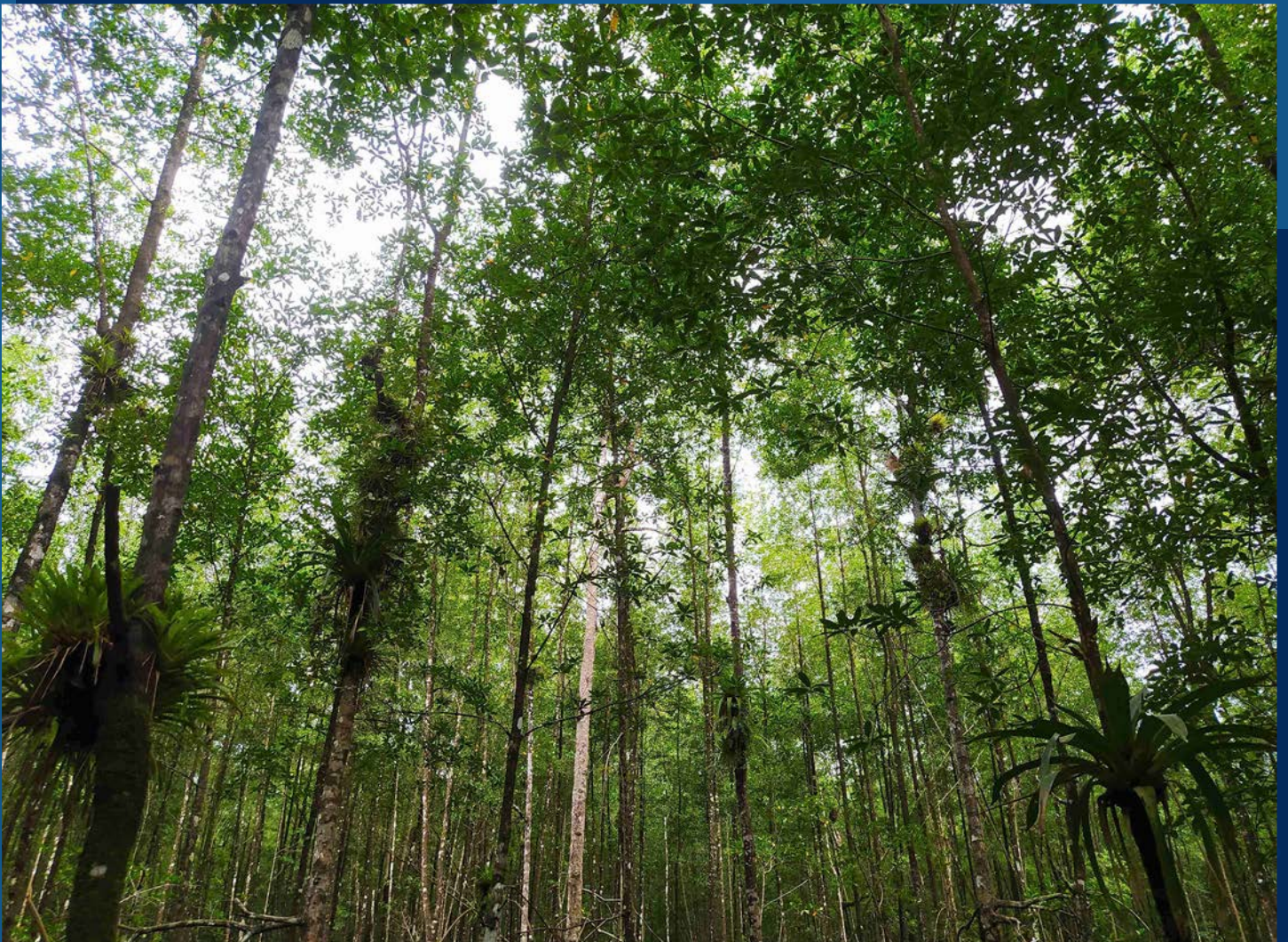


# Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras

Since 1967

## Bulletin of Marine and Coastal Research



Serie de Publicaciones Periódicas

Volumen 53 (2)  
Año 2024 (julio-diciembre / July-December)



Santa Marta • Colombia

ISSN: 0122-9761  
e-ISSN: 2590-4671

# BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS

## Bulletin of Marine and Coastal Research

(Bol. Invest. Mar. Cost.)

ISSN 0122-9761 | e-ISSN 2590-4671

La revista científica *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* está dirigida a la comunidad científica y a las personas relacionadas con temas medioambientales en zonas marino-costeras, con particular énfasis en América tropical. Considera para su publicación trabajos inéditos sobre cualquier tópico de investigación en el mar o en ambientes acuáticos de la zona costera, realizados en las áreas tropicales y subtropicales de América. Es editada desde 1967 por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (Invemar). Hasta el volumen 8 llevó el nombre de “Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín” y entre los volúmenes 9 y 24 se denominó “Anales del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras”. A partir del año 2008 se publican dos números por volumen anual manteniendo esta periodicidad hasta la fecha. La revista se encuentra indexada en Web of Knowledge, SciELO-Colombia, en Scopus (ubicándose en el Q4 del Scimago Journal Ranking (SJR) en la categoría “Animal Science and Zoology”) y recientemente en Publindex.

El Boletín es una publicación completamente **bilingüe** (inglés y español) de **libre acceso**, que puede ser consultada en [www.invemar.org.co/boletin](http://www.invemar.org.co/boletin) y que es distribuida nacional e internacionalmente a través del sistema de canje y donación. Las instrucciones a los autores para la preparación y el envío de manuscritos se encuentran en las últimas páginas de este número y en el portal de Internet.

El *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* se acoge a normas éticas para la publicación de documentos científicos, en particular, a la evaluación por pares (simple ciego) de todos los manuscritos aceptados. Así mismo, se espera que todos los autores hagan seguimiento de un código ético que garantice el avance de la ciencia y la protección del ambiente natural.

.....

*The scientific journal Bulletin of Marine and Coastal Research is written for the science community and any person interested in environmental issues in marine and coastal areas, with emphasis in the tropical Americas region. It considers unedited works about research topics on the sea or coastal aquatic environments, undertaken in the tropical and subtropical areas of the Americas. It has been edited since 1967 by the Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (Invemar) (Marine and Coastal Research Institute). Volumes 1-8 were named “Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín” and between volumes 9 and 24 it was called “Anales del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras”. Since 2008, the journal has published two issues per annual volume. The journal is indexed in Web of Science, SciELO-Colombia, Scopus (in Q4 of Scimago Journal Ranking (SJR) on Animal Science and Zoology category) and currently on Publindex..*

*The Bulletin is a bilingual (English and Spanish) and an open access publication, which can be consulted on [www.invemar.org.co/boletin](http://www.invemar.org.co/boletin) and it is also distributed nationally and internationally through exchange and donation systems. Instructions to authors for preparation and submission of manuscripts are in the final pages of this issue and in our website.*

*The Bulletin of Marine and Coastal Research is based on ethical standards for the publications of scientific documents, in particular about peer review process (single peer review) of all accepted manuscripts. In the same way, The Bulletin expects an ethic code from authors as a guaranty of science advance and natural environment protection.*

### Director general / General Director

Francisco A. Arias Isaza, *PhD*

### Director de la revista / Journal Director

Jesús A. Garay, *MSc*

Invemar, Colombia


### Editor general / Editor-in-Chief

Arturo Acero Pizarro, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia sede Caribe (Cecimar), Colombia

### Comité editorial / Editorial Board

Antonio Baeza, *PhD*

 0000-0002-2573-6773

Clemson University y Smithsonian Marine Station at Fort Pierce, EE. UU.

Arturo Acero Pizarro, *PhD*

 0000-0002-6637-9901

Universidad Nacional de Colombia sede Caribe (Cecimar), Colombia

Edgardo Londoño-Cruz, *PhD*

 0000-0001-5762-9430

Universidad del Valle, Colombia.

Gabriel R. Navas S., *PhD*

 0000-0001-9554-6345

Universidad de Cartagena, Colombia

Gladys Bernal, *PhD*

 0000-0001-6333-6028

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia

Javier A. Díaz Ochoa, *PhD*

 0000-0002-1911-0467

Universidad de Magallanes, Chile

Jorge Enrique Páramo, *PhD*

 0000-0002-8380-2716

Universidad del Magdalena, Colombia

José Horrillo Caraballo, *PhD*

 0000-0001-7694-3812

Swansea University, Reino Unido

José Julián Tavera, *PhD*

 0000-0003-4517-9238

Universidad del Valle, Colombia

Julio César Herrera Carmona, *PhD*

 0000-0003-0446-3275

Universidad del Valle, Colombia

Marco Alejandro Correa, *PhD*

 0000-0002-4714-9553

Invemar, Colombia

María del Pilar Blanco Parra, *PhD*

 0000-0003-2492-2168

Universidad de Quintana Roo, México

María Isabel Criales, *PhD*

 0000-0001-5608-8943

Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia

Maribeb Castro, *PhD*

 0000-0001-6353-1018

Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Mateo López Victoria, *Dr.rer.nat.*

 0000-0002-7307-8680

Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia

Nikita Gaibor, *PhD*

 0000-0002-4773-3434

Instituto Nacional de Pesca, Ecuador

Óscar Álvarez Silva, *PhD*

 0000-0002-5121-5875

Universidad del Norte, Colombia

Valentina Hurtado-McCormick, *PhD*

 0000-0001-9407-5924

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

(CSIRO), Environment Perth, WA, Australia

### Editor invitado Vol. 53 Núm. 2 / Guest Editor Vol. 53 Num. 2

David Alejandro Sánchez, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia sede la Paz, Colombia

### Jefe de Comunicación Científica / Head of Scientific Communication

Isabela Katime Arroyave

Invemar, Colombia

### Asistente del comité editorial / Editorial Board Professional

Tatiana Gómez Orgulloso, *MSc*

Invemar, Colombia

### Traducción / Translation

José Daniel Gutiérrez Mendoza

### Comité científico / *Scientific Board*

Adolfo Sanjuan Muñoz, <i>MSc</i>	 0000-0002-4786-862X
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia	
Andia Chávez Fonnegra, <i>PhD</i>	 0000-0002-6781-0089
Florida Atlantic University, EE. UU.	
Alfredo Gómez Gaspar, <i>MSc</i>	 0000-0002-2430-2738
Museo Marino de Margarita y Universidad de Oriente (Nueva Esparta), Venezuela	
Diego L. Gil Agudelo, <i>PhD</i>	 0000-0001-7873-4694
Texas A&M University at Galveston, EE. UU.	
Efraín Rodríguez Rubio, <i>PhD</i>	 0000-0002-1150-3194
Centro de Innovación y Tecnología-ICP y Ecopetrol, Colombia	
Gloria E. Sánchez, <i>PhD</i>	
Universidad de Magallanes, Chile	
Guillermo Díaz Pulido, <i>PhD</i>	 0000-0002-0901-3727
Griffith University, Australia	
Juan Manuel Díaz, <i>Dr.rer.nat.</i>	 0000-0002-2026-6522
Fundación Marviva, Colombia	
Klaudia Hernández, <i>PhD</i>	 0000-0002-8490-2882
Universidad Andrés Bello, Chile	
Luisa Espinosa, <i>PhD</i>	 0000-0003-1452-3104
Invemar, Colombia	
Marie Luise Schnetter, <i>Dr.rer.nat.</i>	
Justus-Liebig-Universität Gießen, Alemania	
Mónica Puyana, <i>PhD</i>	 0000-0001-7600-3118
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia	
Yves François Thomas, <i>PhD</i>	 0000-0003-1896-0774
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Francia	

### Evaluadores de este número / *Reviewers for this issue*

Matthias Wolf, <i>PhD</i>	ZMT, Bremen, Alemania
Luis Antonio Cubillos Santander, <i>PhD</i>	Universidad de Concepción, Chile
Jose Giovanni Jesús Avila Peltroche, <i>PhD</i>	Chosun University, Corea del Sur / Universidad Científica del Sur, Perú
Héctor Hugo Basaure Marín, <i>PhD</i>	Universidad Católica del Norte, Chile
Enrique Javier Peña Salamanca, <i>PhD</i>	Universidad del Valle, Colombia
Olga María Camacho Hadad, <i>PhD</i>	Universidad del Magdalena, Colombia
Julio César Herrera Carmona, <i>PhD</i>	Universidad del Valle, Colombia
Marco Alejandro Correa, <i>PhD</i>	Invemar, Colombia
David Fernando Morales Giraldo, <i>MSc</i>	Invemar, Colombia
Laura Victoria Perdomo Trujillo, <i>PhD</i>	Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Alberto Ordinola Zapata, <i>PhD</i>	Universidad Nacional de Tumbes, Perú
Otilio Arturo Acevedo Sandoval, <i>PhD</i>	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
Rodrigo Alexis Wiff Onetto, <i>PhD</i>	Center of Applied Ecology & Sustainability, Chile
Juan David González Corredor, <i>MSc</i>	Universidad de Miami, EE.UU.
Daniel González-Mendoza, <i>PhD</i>	Universidad Autónoma de Baja California, México
Yuriko Jocselin Martínez, <i>PhD</i>	Universidad Autónoma de Baja California Sur, México
Milena Benavides Serrato, <i>PhD</i>	Investigadora independiente, Colombia
Giomar Borrero, <i>PhD</i>	Investigadora independiente, Colombia

### Foto portada / *Cover Photo*

Manglares, Colombia. Foto: Archivo Invemar

### Diagramación y montaje / *Layout and Assembly*

John Khatib (Ediprint SAS)

### Canje / *Exchange*

Centro de Documentación / *Documentation Center (CDO)* • E-mail: [bibliote@invemar.org.co](mailto:bibliote@invemar.org.co)

### Boletín en línea / *Online Bulletin*

[www.invemar.org.co/boletin](http://www.invemar.org.co/boletin)

---

**Derechos reservados conforme a la ley**  
**El Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras está bajo la licencia de Creative Commons**  
**Atribución-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional**

**All rights reserved by law**  
**The Bulletin of Coastal and Marine Research is under Creative Commons license**  
**BY-NC-SA 4.0**



**Citar los artículos / Citation Style:**  
Autores. 2024. Título del artículo. Bol. Invest. Mar. Cost., 53(2): rango de páginas.  
Authors. 2024. Title of article or note. Bull. Cost. Mar. Res., 53(2): page range.

---

# **BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS**

**Bulletin of Marine and Coastal Research**

**(Bol. Invest. Mar. Cost.)**

Registrado en Scopus, Publindex, Biological Abstracts, Biosis Previews,  
Periódica, Zoological Record, Latindex, Scielo-Colombia  
DOAJ e ISI Web of Knowledge

**53 (2)**



**Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras  
“José Benito Vives de Andrés”**

Vinculado al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Santa Marta, Colombia, 2024 (julio-diciembre / *July-December*)



## ***OBITUARIO***

### **Georges Vernet**

*(1943 – 2023)*

Georges Vernet nació en Nimes, en el sur de Francia en 1943, hijo de una familia profundamente católica donde fueron 14 hermanos que atesoró y cuidó siempre. Hizo sus primeros estudios en Montpellier de joven cuando vivió en casa de la abuela materna. Empezó con Física, Química y Matemáticas. Al terminar sus estudios se fue a prestar el servicio social obligatorio en la Embajada de Francia en Bogotá. Allí se dio cuenta de todo lo que había por hacer en Colombia. Regresó a trabajar en la Facultad de Geología de la Universidad de Bordeaux donde recibió el título de Doctor de Estado y Maestro de Conferencias con una enorme tesis sobre el diapirismo y la sedimentología de la plataforma continental del Caribe colombiano.

Al finalizar sus estudios regresó a Colombia como Jefe de la Misión Técnica Francesa en la Escuela Naval de Cadetes de Colombia desde donde ayudó en la creación del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Cioh). El primer Boletín Científico del Centro lleva un artículo de su autoría. Georges vivió muchos años entre nosotros, conoció la idiosincrasia y disfrutó la manera de vivir costeña.

Durante esos años, además de trabajar en la geología de la plataforma continental de Colombia, dictaba clases en la Universidad Jorge Tadeo Lozano, en la Universidad Eafit de Medellín y participó en varios proyectos de investigación desde el Instituto de Investigaciones Marinas (Invemar), donde también desarrollo numerosas actividades relacionadas con su papel como consultor de la

Comisión Intergubernamental de Oceanografía para el Caribe (Iocaribe). Siendo un hombre muy humilde y sencillo, nunca se ufanó de nada, pero a lo largo de 30 años de actividad científica se convirtió en uno de los más importantes investigadores de la Geología Marina de Colombia. Sus trabajos sobre el volcanismo de lodo y la sedimentología marina, así como sus observaciones sobre la variación del nivel del mar debido a los cambios climáticos y los correspondientes cambios en la línea costa fueron pioneros y nos dejaron un plan y una visión que sigue siendo validada.

Sus últimos esfuerzos estuvieron dedicados a traducir al castellano su Tesis de Estado, que a pesar de tener medio siglo sigue siendo una pieza fundamental para el conocimiento y formación en geología marina. Pero el tiempo no le alcanzó y Georges nos dejó a finales del año pasado. También nos entregó un legado enorme en conocimiento, en el método y la forma, pero sobretodo en la formalidad amable y cordial, seria, pero cercana y jovial, todo al tiempo. Siempre regaló una sonrisa a pesar de la adversidad del presupuesto, de la organización y fue generoso con los amigos, aquí y en Bordeaux y en Nimes, donde nos recibió.

Georges, hoy te abrazamos y despedimos, te saludamos desde esta tu Colombia que ayudaste a conocer, te damos las gracias por todo lo que nos regalaste. Hasta siempre mi amigo.

Con su permiso; a nombre de todos los que te conocimos.

**Carlos Alberto Andrade**





---

## TABLA DE CONTENIDO / CONTENTS

---

### ARTÍCULOS / ARTICLES

**Pedro Ramiro Castillo, Marilú Bouchon, Daniel Grados y Renato Guevara-Carrasco**

Actores que intervienen en las recomendaciones de la cuota de pesca en la anchoveta (*Engraulis ringens*) en Perú

Actors involved in the recommendations of the fishing quota for Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*) . . . . . 11

**Diocelina Huaman-Fernández, Paul M. Baltazar-Guerrero, Samuel J. Arbaiza-Quispe y Orlando Advíncula Zeballos**

Evaluación en la formación de discos de fijación secundaria de *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) en condiciones de cultivo semi-controladas

Evaluating the formation of secondary attachment discs of *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) under semi-controlled cultivation conditions . . . . . 31

**Santiago González-Rojas, Jorge Paramo, Silvia Salas C., Sigmer Quiroga, José Cusba, Samuel Núñez y Adolfo Sanjuan-Muñoz**

Hábitos alimentarios del bonito *Euthynnus alletteratus* y la albacora *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) en el Caribe colombiano

Feeding habits of bonito *Euthynnus alletteratus* and albacore *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) in the Colombian Caribbean. . . . . 45

**Willian Ruiz-Ipanaque, Paul Baltazar-Guerrero, Max Castañeda-Franco y Arturo Mires-Reyes**

Capacidad regenerativa post-cosecha de la macroalga roja *Chondracanthus chamissoi* en dos sistemas de cultivo en la costa centro-sur del Perú

Post-harvest regenerative capacity of the red macroalgae *Chondracanthus chamissoi* in two culture systems in the south-central coast of Peru . . . . . 67

**José Francisco Valverde Calderón y Gustavo Barrantes Castillo**

Variación del nivel del mar en el Caribe de Costa Rica, Centroamérica

Sea level variation in the Caribbean of Costa Rica, Central America . . . . . 85

**Julio César Herrera Carmona, Johanna Prüssmann Uribe, Melissa Abud Hoyos y Luis Alonso Zapata**

Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia

Vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socio-ecosystem in Colombia . . . . . 103

**Erick Méndez-Macias y Geovanna Parra-Riofrío**

Impacto de la alimentación automática sobre la calidad del suelo en cultivo de *Litopenaeus vannamei*

Impact of automatic feeding on soil quality in *Litopenaeus vannamei* cultivation . . . . . 133

## ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

**Ángela Pacheco Flores-de-Valgaz, Estefany Lema Choez, Jaime Naranjo-Morán y Patricia Manzano Santana**

Macroalgas rojas: una alternativa ecológica para la agricultura sostenible del Ecuador

Red macroalgae: an ecological alternative for sustainable agriculture in Ecuador . . . . . 143

## NOTAS / NOTES

**Alexander Lopeztegui-Castillo**

Forma atípica de estrella de mar del género *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) encontrada en el golfo de Batabanó, Cuba, Mar Caribe.

Atypical sea star of the genus *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) found in the Gulf of Batabanó, Cuba . . . . . 169

**Guía de autores / Author's guide** . . . . . 177

**Ética de publicación / Publication ethics** . . . . . 182



## Actores que intervienen en las recomendaciones de la cuota de pesca en la anchoveta (*Engraulis ringens*) en Perú

### Actors involved in the recommendations of the fishing quota for Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*)

Pedro Ramiro Castillo\*, Marilú Bouchon, Daniel Grados y Renato Guevara-Carrasco

0000-0003-0580-2742

0000-0001-7458-0878

0000-0001-5184-2740

0000-0001-5734-2077

Instituto del Mar del Perú (Imarpe). Esq. Gamarra y General Valle s/n. Chucuito, Callao. Perú. ramirocasti@gmail.com\*, mbouchon@imarpe.gob.pe, dgrados@imarpe.gob.pe, rguevara@imarpe.gob.pe

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Este artículo describe los actores que intervienen en la recomendación de la cuota de captura de anchoveta, previo a las temporadas de pesca para cada región (norte-centro y sur), así como el sesgo asociado a la misma. Los datos de las biomásas, cuotas y desembarques corresponden al período 2000-2022, mientras que las recomendaciones para la cuota total corresponden a 2019-2022. Para la región norte-centro, el Imarpe recomienda a Produce una tasa de explotación menor o igual a 0.35 mediante una tabla de decisión para cuatro escenarios probables de ambiente oceanográfico, considerando una biomasa remanente para asegurar su sostenibilidad. El cumplimiento de las cuotas de capturas de anchoveta en las primeras temporadas de pesca ha sido mayor a 90 %, mientras que en las segundas temporadas de pesca se han capturado inclusive menores a 50 %, como es el caso del: 2001, 2019, 2010 y 2017. Entre 2019 y 2022, Produce optó lo siguiente: i) con cuota menor a la recomendada en la tabla de decisión (I-2021, II-2020, I-2019) y ii) con cuota mayor a la recomendada en la biomasa a la tabla de decisión (I-2022, II-2021, II-2022, II-2019 y I-2020). El error de observación es menor (0.10) en los cruceros de verano y mayor (0.15) en invierno-primavera (cruceros de biomasa desovante e hidroacústicos).

**PALABRAS CLAVE:** cuota de pesca, temporada de pesca, evaluación hidroacústica, dinámica poblacional, biomasa de anchoveta

#### ABSTRACT

This article describes the actors involved in the recommendation of the Peruvian anchoveta catch quota prior to the fishing seasons of each region (north-central and south), as well as the bias associated with it. The data on biomasses, quotas, and landings correspond to the 2000-2022 period, while the recommendations for the total quota correspond to 2019-2022. For the north-central region, Imarpe recommends Produce an exploitation rate lower than or equal to 0.35. This is done through a decision table for four probable oceanographic environment scenarios, considering a remaining biomass to ensure sustainability. The compliance of Peruvian anchoveta catches quotas in the first fishing seasons has been higher than 90 %, while in the second fishing seasons, catches have even been less than 50 %, as in the case of: 2001, 2019, 2010 and 2017. Between 2019 and 2022, Produce opted for the following: i) with a quota lower than that recommended in the decision table (I-2021, II-2020, I-2019) and ii) with a quota higher than that recommended in the biomass of the decision table (I-2022, II-2021, II-2022, II-2019 and I-2020). The observation error is lower (0.10) for the summer surveys and higher (0.15) for the winter-spring (spawning biomass and hydroacoustic surveys).

**KEY WORDS:** fishing quota, fishing season, hydroacoustic assessment, population dynamics, anchoveta biomass

## INTRODUCCIÓN

La pesquería de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el Perú, está sustentada por la alta productividad y variabilidad del ecosistema de la Corriente de Humboldt (Nixon y Thomas, 2001; Agüero, 2007; Bakun y Weeks, 2008). La gestión de la pesquería de la anchoveta en Perú evolucionó desde un acceso abierto con cuotas globales desde 1966 (D.S. N° 066), hasta un sistema de cuotas individuales por unidad de pesca denominado Límites Máximos de Captura por Embarcación (LMCTP) en 2008 (D.L. N° 1084), que empezó a ser efectiva a partir de la primera temporada de pesca de 2009 (Aranda, 2009), terminando de esta manera una carrera desmedida por obtener en el menor tiempo posible la mayor proporción de la cuota de captura (“carrera olímpica”). El LMCTP es la cuota de pesca asignada para cada embarcación en una temporada determinada.

El manejo pesquero de la anchoveta cuenta con un marco regulatorio más desarrollado que otras especies pesqueras y está regulada según el destino de las capturas por Consumo Humano Directo (CHD) o Consumo Humano Indirecto (CHI). Las herramientas de gestión más importantes son: i) la ley general de pesca, ii) la ley y el reglamento sobre el Límite Máximo de Captura Total Permissible (LMCTP) que establecen de manera diferenciada para la región norte-centro y para la sur un sistema de cuotas individuales de captura para la flota industrial y iii) el Reglamento de Ordenamiento Pesquero (ROF) para CHD (Monteferri *et al.*, 2020). El LMCTP es la cuota total en toda la temporada de pesca. Por otro lado, el manejo de la anchoveta está centrado en la sostenibilidad del recurso, por lo que las cuotas globales de captura y las vedas biológicas han sido las medidas de manejo más utilizadas.

La alta variabilidad oceanográfica y la baja capacidad de ser pronosticada genera “incertidumbre ecológica” al diagnóstico y al manejo de la pesquería, lo que ha ocasionado que la ordenación pesquera peruana sea muy dependiente de las condiciones ambientales a corto plazo (Bouchon, 2018). Lo que impulsó al desarrollo de metodologías más precisas en la obtención de información biológico-pesquera y que permitieran implementar medidas de manejo a muy corto plazo, conocido como “manejo adaptativo”, cuya finalidad es conciliar la sostenibilidad de los recursos vivos con la actividad pesquera logrando que ésta sea sostenible en el tiempo (Chávez y Messie, 2008; Arias-Screiber *et al.*, 2011).

La aplicación de estas normas por los gestores se fundamenta principalmente en evidencias científicas,

## INTRODUCTION

Anchoveta (*Engraulis ringens*) fishing in Peru is supported by the high productivity and variability of the Humboldt current ecosystem (Nixon and Thomas, 2001; Agüero, 2007; Bakun and Weeks, 2008). Anchoveta fishing management in Peru has evolved from open access with global quotas starting in 1966 (D.S. N° 066) to a system with individual quotas per fishing units, which is denoted as the maximum permissible total catch limit (MPTCL) per vessel, established in 2008 (D.L. N° 1084) and put into effect in the first fishing season of 2009 (Aranda, 2009), thus ending an unbridled race for obtaining the highest proportion of the catch quota in the shortest possible time (dubbed as Olympic race). The MPTCL is the fishing quota assigned to each vessel in each season.

Anchoveta fishery management has a more developed regulatory framework than that of other species. It is regulated according to the purpose of the catches: direct human consumption (DHC) or indirect human consumption (IHC). The most relevant management tools are i) the general fishing law; ii) the law and regulations regarding the MPTCL, which establish differentiated systems of individual catch quotas for the industrial fleet in the north-central and southern regions; and iii) the Fisheries Management Regulation for DHC (Monteferri *et al.*, 2020). The MPTCL represents the total quota throughout the fishing season. Moreover, anchoveta management is focused on resource sustainability, which is why global catch quotas and biological rests have been the most frequent measures.

High oceanographic variability and low forecasting capabilities generate ecological uncertainty regarding the diagnostics and management of fishery. This has caused Peruvian fishery management to be dependent on short-term environmental conditions (Bouchon, 2018) and has prompted the development of more accurate methodologies to obtain fishery-biological information thought of a scientific survey and to allow implementing very short-term management measures. This is known as adaptive management, and its purpose is to reconcile the sustainability of living resources with fishing activity, making it sustainable over time (Chávez and Messie, 2008; Arias-Screiber *et al.*, 2011).

The application of these regulations by managers is mainly founded upon scientific evidence provided by the Peruvian Institute of the Sea (Imarpe). Imarpe’s work is fundamental to understanding the population and biological status of anchoveta. The Institute’s general mission is to

realizados por el Instituto del Mar del Perú (Imarpe). La labor de Imarpe es fundamental para el conocimiento de la población y situación biológica de la anchoveta, cuya misión general es de promover y realizar investigaciones científicas y tecnológicas del mar, aguas continentales y de los recursos vivos de ambos, con el objeto de lograr el aprovechamiento racional de los mismos; proporcionando al Ministerio de la Producción y a la comunidad científica los estudios de manera veraz y oportuna (Produce, 2012). Adicionalmente, a estas investigaciones científicas se considera también el factor socioeconómico, establecida por los gestores.

La captura anual de la anchoveta está distribuida en dos temporadas de pesca y es realizada por embarcaciones pesqueras de cerco conocidas como “bolicheras” y registradas en el Viceministerio de Pesquería de Produce. La implementación del sistema de cuotas individuales por embarcación fue una respuesta a la problemática existente desde fines de la década de los noventa como eran: el exceso de flota, la sobre-inversión en plantas y flota, la informalidad en el sector, el riesgo de la sostenibilidad en el recurso, los problemas ambientales, entre otros. La Cuota Individual por Embarcación es el resultado de distribuir en cada temporada de pesca el LMCTP o Cuota de Captura Total (TAC) para el consumo humano indirecto (CHI) entre un número finito de embarcaciones y es Produce quien establece, asigna, regula y monitorea estas cuotas individuales (Monteferri *et al.*, 2021).

Las dos temporadas de pesca se basan principalmente en los períodos posteriores al desove de la anchoveta. Esta especie desova casi todo el año, con dos períodos de mayor intensidad, el principal en invierno (agosto-setiembre) y otro en verano (febrero-marzo) (Santander y Sandoval de Castillo, 1969; Perea *et al.*, 2011; Bouchon, 2018). La finalización o suspensión de la temporada de pesca está sujeta a: i) como cumplimiento de la TAC, ii) extracción de juveniles previstos (así no se haya cumplido el TAC), iii) inicio del período del desove, y iv) condiciones ambientales anómalas (p. ej., El Niño de intensidad extraordinaria 1997-1998).

La región norte-centro (04°30′-15°59′S) es considerada como la de mayor abundancia y distribución de la anchoveta encontradas en las últimas décadas, comparada con la región sur (16°00′S-18°20′S) (Ñiquen *et al.*, 2000). Para estas regiones son aplicadas dos temporadas en forma independiente; para la región norte-centro se realizan normalmente entre abril-junio y entre noviembre-febrero, mientras que para la sur se realizan entre enero-junio y entre julio-diciembre; es decir, semestralmente.

promote and carry out scientific and technological research of the sea and continental waters, as well as of the living resources of both while aiming for rational utilization. They provide these studies to the Ministry of Production (Produce) in a truthful and timely manner (Produce, 2012). In addition to the biomass results of these scientific investigations, the socioeconomic factor – established by the managers – is also considered, which, in some cases, can increase or decrease the fishing quota.

The annual anchoveta catch is distributed in two fishing seasons and is carried out by purse seine fishing vessels known as *bolicheras* that are registered in the Produce’s Vice-Ministry of Fishery. The implementation of the system of individual quotas per vessel was a response to issues dating back to the late 90s, *i.e.*, fleet overcapacity, overinvestment in plants and fleet, informality in the sector, the resource’s sustainability risk, and environmental issues, among others. The per-vessel individual quota is the result of distributing the MPTCL, or the total catch quota (TCQ), for IHC among a finite number of vessels, and it is the Produce who establishes, assigns, regulates, and monitors these individual quotas (Monteferri *et al.*, 2021).

The two fishing seasons are primarily based on the periods following the spawning of the anchoveta. This species spawns almost all year long, with two higher-intensity periods, the main one being in winter (August-September) and the other one in summer (February-March) (Santander and Sandoval de Castillo, 1969; Perea *et al.*, 2011; Bouchon, 2018). The end or suspension of the fishing season is subject to i) reaching the TCQ, ii) the extraction of the expected juveniles (even if the TCQ has not been reached), iii) the start of the spawning period, and iv) anomalous environmental conditions (*e.g.*, the extraordinary-intensity El Niño in 1997-1998).

In recent years, the north-central region (04°30′-15°59′S) has been regarded as the one with the greatest abundance and distribution of anchoveta in comparison with the southern region (16°00′S-18°20′S) (Ñiquen *et al.*, 2000). In these regions, two seasons are independently implemented: for the north-central region, they take place between April and June and between November and February, while, for the southern region, they take place between January and June and between July and December. This corresponds to a biannual regime.

Un aspecto que se debe considerar previo a estas temporadas de pesca es la variabilidad oceanográfica. La alta variabilidad climática, que puede ser estacional (verano-invierno), interanual (El Niño-La Niña), periódica (períodos cálidos y fríos) y secular (alta y baja variabilidad), influyen en la distribución y abundancia de las especies del ecosistema pelágico y demersal (Espino, 2014). Esta variabilidad climática puede producir desplazamientos horizontales y/o verticales de la anchoveta en tiempos cortos y se puede dar en el tiempo transcurrido entre la finalización de las investigaciones realizadas y el inicio de la temporada de pesca. En eventos interanuales como El Niño, que afecta a la población de anchoveta y que en parte están disponibles a la flota pesquera por la cercanía a la costa, las altas capturas podrían producir una disminución en su biomasa sino hay un control idóneo, como lo ocurrido en El Niño: 1972–73, 1982–83 y 1997–98 (Peña Tercero, 2019). La única forma es efectuar investigaciones periódicas para evaluar el impacto del evento y de la pesquería, para garantizar la sostenibilidad de la especie.

Una de las razones para plantear una pregunta de investigación es definir el nivel de responsabilidad de los actores que intervienen en las decisiones para mantener una población saludable de la anchoveta en el Perú. Ante ello, el presente artículo tiene por finalidad evaluar el nivel de responsabilidad de los diversos actores que participan en el proceso de evaluación de la anchoveta y que posteriormente se remiten las recomendaciones a Produce mediante unas tablas de decisión para la determinación de las cuotas de captura de anchoveta, principalmente de la región norte-centro. El proceso se inicia con las investigaciones realizadas por el Imarpe, y las decisiones son realizadas por Produce de manera independiente para ambas zonas (región norte-centro y región sur).

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

La ejecución de las actividades comprendidas en cada proceso de evaluación de la anchoveta es responsabilidad de las diferentes áreas científicas del Imarpe de acuerdo con su especialidad. La Dirección General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático (DGIOCC) del Imarpe es responsable del desarrollo del crucero de evaluación de la biomasa desovante de anchoveta de la región norte-centro (Método de Producción de Huevos-MPH), de elaborar el informe final de esa operación, y de la descripción del cuadro ambiental y sus proyecciones a corto plazo.

One aspect to be considered prior to these fishing seasons is oceanographic variability. High climate variability, which may be seasonal (summer-winter), interannual (El Niño-La Niña), periodical (warm and cold periods), or secular (high and low variability, exerts an influence on the distribution and abundance of species in the pelagic and demersal ecosystems (Espino, 2014). This climate variability may generate horizontal and/or vertical displacements of anchoveta in short periods of time. This variability can also occur at the end of the research survey and the beginning of the fishing season. In interannual events such as El Niño, which affects the population of anchoveta that is partially available to the fleet given its proximity to the coast, high catch values could entail a biomass reduction if no suitable control is implemented, as occurred in the following El Niño events: 1972-73, 1982-83, and 1997-98 (Peña Tercero, 2019). The only way is to conduct periodical research to assess the impact of these events and of fishery, aiming to ensure the sustainability of the species.

One of the reasons for proposing a research question is to determine the extent of responsibility of various actors involved in decision-making aimed at maintaining a healthy anchoveta population in Peru. Considering this, the present article aims to appraise the extent of the responsibility of various actors participating in the anchoveta evaluation process, which subsequently leads to the issuance of recommendations to Produce via decision tables for determining catch quotas, primarily in the north-central region. This process begins with research conducted by Imarpe, and decisions are made by Produce independently for each zone (north-central and southern regions).

## **MATERIALS AND METHODS**

The execution of the activities corresponding to each anchoveta evaluation process is assigned to the various scientific areas of Imarpe depending on their specialty. Imarpe's General Research Directorate for Oceanography and Climate Change (DGIOCC) is entrusted with the survey for the assessment of anchoveta spawning biomass in the north-central region (egg production method, or EPM), as well as with elaborating the final report of said operation and describing the environmental landscape and its short-term projections.



La Dirección General de Investigaciones en Hidroacústica, Sensoramiento Remoto y Artes de Pesca (DGIHSA) del Imarpe es responsable de la evaluación directa de la biomasa de anchoveta de la región norte-centro y región sur, mediante el desarrollo de los cruceros de evaluación hidroacústica de recursos pelágicos, los que se ejecutan de manera periódica según la programación de actividades de campo del Imarpe y de elaborar el informe final del crucero. La Dirección General de Investigaciones de Recursos Pelágicos (DGIRP) del Imarpe, es responsable de coordinar permanentemente los aspectos científicos de las operaciones de campo con las otras Direcciones Generales, de la evaluación de anchoveta de la región norte-centro y región sur, mediante métodos indirectos (modelos de dinámica poblacional) y la consolidación de los resultados de cada proceso de evaluación, y de elaborar y presentar el informe final con proyecciones de pesca a la Alta Dirección para su aprobación y remisión a Produce.

El proceso de evaluación de la anchoveta incluye todas las acciones que desarrolla el Imarpe previo a cada temporada de pesca de anchoveta (Imarpe, 2020), incluye dos fases:

#### **Fase I. Métodos directos:**

##### **Crucero de evaluación de biomasa desovante de la anchoveta**

El crucero permite estimar la biomasa desovante de la anchoveta a partir de la cuantificación de la cantidad de huevos en el mar, producto del desove (considerado también como MPH) y es realizada entre agosto y setiembre, precisamente en el período de mayor reproducción o desove de la anchoveta. En este proceso de cálculo se consideran cinco parámetros poblacionales: el peso promedio individual, la fecundidad parcial, la proporción sexual, la frecuencia de desove y la cantidad de huevos que se están produciendo por día.

La biomasa desovante es la fracción del stock, medida en peso, que es capaz de aportar mediante el proceso de desove, nuevos ejemplares al stock. En términos simples, la biomasa desovante resulta de la multiplicación de la biomasa total a la edad (o talla) por la proporción de ejemplares maduros a la edad (o talla). La metodología está descrita en Ayón *et al.* (2001).

##### **Crucero de evaluación hidroacústica de la anchoveta**

El crucero realiza investigaciones sobre la distribución, biomasa y disponibilidad de los principales

The General Research Directorate for Hydroacoustics, Remote Sensing, and Fishing Gear (DGIHSA) is entrusted with directly evaluating the biomass of anchoveta in the north-central and southern regions via hydroacoustic research surveys of pelagic resources, which are periodically carried out according to Imarpe's field activity schedule. In addition, they must elaborate the final survey report. The General Research Directorate for Pelagic Resources (DGIRP) is entrusted with permanently coordinating the scientific aspects of field operations with the other General Directorates regarding the evaluation of anchoveta in the north-central and southern regions via indirect methods (population dynamics models) and consolidating the results of each evaluation process. In addition, they must elaborate and present the final report with fishing projections to Senior Management for their approval and submission to Produce.

The evaluation process includes all actions performed by Imarpe prior to each anchoveta fishing season (Imarpe, 2020). It comprises two phases:

#### **Phase I. Direct methods:**

##### **Research survey for anchoveta spawning biomass**

This survey allows estimating the spawning biomass of anchoveta by quantifying the eggs in the sea, a product of spawning (also known as the *EPM*), and it is carried out between August and September, precisely in the period of greatest reproduction or spawning of anchoveta. In these calculations, five population parameters are considered: individual average weight, partial fertility, sexual proportion, spawning frequency, and the number of eggs being produced per day.

Spawning biomass is the fraction of the stock, measured in weight, that can contribute with new specimens to the stock via the spawning process. In simple terms, spawning biomass is the result of multiplying the total biomass at a given age (or size) by the proportion of mature specimens at that age (or size). This methodology is described in Ayón *et al.* (2001).

##### **Survey for the hydroacoustic assessment of anchoveta**

This survey conducts research on the distribution, biomass, and availability of the main fishing resources via hydroacoustics, *i.e.*, by applying sound or echo in the water. The echo is emitted by a sonar system, which allows recording all objects or targets below the sea surface or water column. This system is installed on a research platform.

recursos pesqueros, mediante el uso de la hidroacústica; es decir, en la aplicación del sonido o eco en el agua. El eco es emitido por un sistema sonar, que permite registrar todos los objetos o blancos que se encuentran debajo de la superficie del mar o columna de agua y que está instalado en una plataforma de investigación. Gracias a la intensidad del eco, el sistema acústico es capaz de identificar el fondo del mar y los distintos cardúmenes, así como su densidad. Este tipo de crucero es realizado dos veces al año, uno en febrero-abril (verano) y otro en setiembre-octubre (primavera). Existen diversas técnicas de muestreo acústico y de estimación de biomasa. La metodología usada en el mar peruano está descrita en Castillo *et al.* (2011).

La información oceanográfica obtenida en el crucero es complementada con la información satelital para su actualización. Para los pronósticos a corto plazo de las condiciones oceanográficas, se recurre a las salidas de los modelos internacionales European Centre for Medium-Range Weather Forecasts model, North American Multi-Model Ensemble model de la NOAA y Coupled Forecast System model de la NOAA).

## **Fase II. Evaluación mediante métodos de evaluación indirecta:**

### **Modelo de dinámica poblacional**

Se aplica un modelo basado en acústica acoplado a modelos de dinámica poblacional, donde el método de evaluación de la anchoveta difiere de los tradicionales en tres aspectos: i) uso de un horizonte de proyección conservador para establecer los límites de gestión; ii) uso de cruceros de evaluación hidroacústica como observaciones directas en tiempo casi real como condición inicial para la proyección de las capturas y iii) inclusión de la variabilidad ambiental en las proyecciones, utilizando parámetros poblacionales variables para diferentes escenarios ambientales según las mejores previsiones disponibles sobre el estado del ecosistema. Este paradigma de evaluación fue desarrollado en el marco de la variabilidad natural del medio ambiente impulsada principalmente por El Niño/Oscilación del Sur (ENSO). El procedimiento y aplicación de este modelo se describe en Imarpe (2020) y Oliveros-Ramos *et al.* (2021). Finalmente, se elabora un informe de gestión sobre el estado poblacional de la anchoveta, el cual es elevado a la Alta Dirección para su aprobación y remisión a Produce.

Para la región sur se aplica el Modelo de Producción Excedente, que sugiere que desde 2008, la mortalidad por pesca que se viene aplicando sobre el stock, ya sea en términos

Thanks to the intensity of the echo, the acoustic system can identify the bottom of the sea and different schools, in addition to their density. This type of survey is carried out twice a year: one in February-April (summer) and another one in September-October (spring). There are different acoustic sampling and biomass estimation techniques. The methodology employed in the Peruvian sea is described in Castillo *et al.* (2011).

The oceanographic information obtained in the survey is complemented with satellite data for updating purposes. For short-term forecasts of oceanographic conditions, the outputs of international models are employed, *i.e.*, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts model and NOAA's North American Multi-Model Ensemble and Coupled Forecast System models.

## **Phase II. Evaluation through indirect methods:**

### **Population dynamics model**

An acoustics-based model is applied, coupled with population dynamics models, wherein the anchoveta evaluation process differs from traditional ones in three aspects: i) the use of a conservative projection horizon to determine management limits; ii) the use of hydroacoustic surveys for direct observations in almost real time as an initial condition for catch projection; and iii) the inclusion of environmental variability in projections, using variable population parameters for different environmental scenarios, according to the best forecasts available regarding the state of the ecosystem. This evaluation paradigm was developed within the framework of the natural variability of the environment, mainly driven by El Niño/South Oscillation (ENSO). The procedures and implementation of this model are described in Imarpe (2020) and Oliveros-Ramos *et al.* (2021). Finally, a management report on the population state of anchoveta is elaborated, which is taken to Senior Management for their approval and submission to Produce.

For the southern region, the Surplus Production Model is applied, which suggests that, since 2008, the fishing mortality applied to the stock, whether in terms of rate (F) or absolute figures (landings), has been below its reference level (FMSY or MSY). To estimate the maximum total catch in the southern region, the same procedure for the north-central region is followed, with a differentiating element in the dynamic biomass models. A dynamic biomass model summarizes the dynamics of a stock (growth + recruitment + mortality + migration) in a simple production function, whose formulation is:



de tasa ( $F$ ) o cifras absolutas (desembarques), son menores a su nivel de referencia (FMSY o MSY). Para estimar la máxima captura total en la región sur es el mismo procedimiento utilizado para la región norte-centro con elemento de contraste de los modelos de biomasa dinámica. El modelo de biomasa dinámica resume la dinámica de un stock (Crecimiento + Reclutamiento – Mortalidad – Migración) en una simple función de producción, cuya formulación es:

$$P_t = r B_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right)$$

Donde:  $P_t$  es la producción del stock en el tiempo  $t$ ,  $r$  es la tasa de crecimiento poblacional,  $B_t$  es la biomasa en el año actual y  $K$  es la capacidad de carga (Díaz y Oliveros, 2015).

### Otras informaciones complementarias

La información complementaria son los cruceros del MPH, prospecciones oceanográficas, operaciones Eureka, monitoreo de la pesquería, entre otros; con datos de los parámetros biológicos pesqueros como selectividad de las redes de cerco, crecimiento, procesos de madurez sexual, desove, relación longitud-peso, parámetros estimados en retrospectiva. Para la región norte-centro, se realiza un diagnóstico de las condiciones oceanográficas en el período en la cual se realiza el Crucero de Evaluación Hidroacústica y su respuesta es clave (Mathisen, 1989; Bertrand *et al.*, 2004, 2008; Joo *et al.*, 2014; Castillo *et al.*, 2019; Morón *et al.*, 2019); así como, se observó en los últimos años (Imarpe, 2012, 2014a, 2014b, 2015, 2016b) la ocurrencia de anomalías oceanográficas en el área de distribución que alteraron el comportamiento espacial de la anchoveta.

### Fase III. Decisión

#### Dirección de Políticas y Ordenamiento de Produce

Depende de la Dirección General de Políticas y Análisis Regulatorio en Pesca y Acuicultura (Dgparpa). Entre las funciones principales están formular, evaluar y difundir normas, lineamientos, reglamentos entre otros en materia de pesca y acuicultura; así como, administrar el registro de embarcaciones que efectúen actividades en altamar en el marco de las medidas de ordenamiento pesquero.

#### Oficina general de Asesoría Jurídica de Produce

Es el órgano de asesoramiento responsable de emitir opinión y asesorar en asuntos de carácter jurídico-legal a la Alta Dirección y a los demás órganos del Ministerio de la Producción.

$$P_t = r B_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right)$$

Where:  $P_t$  is the production of the stock over time  $t$ ,  $r$  is the population growth rate,  $B_t$  is the biomass of the current year, and  $K$  is the load capacity (Díaz and Oliveros, 2015).

### Other complementary data

The complementary information comprises EPM surveys, oceanographic prospection, Eureka operations, and fishery monitoring, among others. This includes data on fishing biological parameters such as the selectivity of purse seine nets, growth, sexual maturity processes, spawning, and the length-weight relationship, these parameters are retrospectively estimated. In the north-central region, a diagnosis of oceanographic conditions is made for the period when the hydroacoustic survey is conducted, and this response is key (Mathisen, 1989; Bertrand *et al.*, 2004, 2008; Joo *et al.*, 2014; Castillo *et al.*, 2019; Morón *et al.*, 2019). In addition, as observed in recent years (Imarpe, 2012, 2014a, 2014b, 2015, 2016b) the occurrence of oceanographic anomalies in the distribution area altered the spatial behavior of anchoveta.

### Phase III. Decision-making

#### Policies and Management Directorate of Produce

This office depends on the Produce's General Directorate for Policy and Regulatory Analysis in Fishing and Aquaculture (Dgparpa). Among its main functions are formulating, evaluating, and disseminating norms, guidelines, and regulations, among others, regarding fishing and aquaculture, in addition to managing the register of vessels performing activities in the open sea, within the framework of fishery management measures.

#### Produce General Office of Legal Advice

It is the advisory body responsible for issuing opinions and advising on legal matters for Senior Management and the other bodies within the Ministry of Production.

## METODOLOGÍA

Se efectuó un diagrama de flujo del proceso para determinar la cuota de pesca de una temporada de pesca de la anchoveta, que generalmente son dos temporadas al año; tanto para la región norte-centro como para la temporada sur. Para la decisión de la cuota de captura total de la anchoveta se considera el informe situacional y perspectivas de pesca de la anchoveta para una temporada de pesca, que es generada por el Imarpe a través de sus investigaciones marinas. En este informe se detalla las tablas de decisión para diversos escenarios oceanográficos ambientales, y la condición ambiental recomendado con tasas de explotación menores a 0.35 ( $E \leq 35\%$ ). Se considera una biomasa desovante remanente que quedaría disponible después de la temporada de pesca, alrededor de  $5 \times 10^6$  ton (informes presentados a Produce). Los procedimientos están descritos en Imarpe (2020) y Oliveros-Ramos *et al.* (2021). Produce determina la cuota total de la temporada de pesca o el LMCTP descritos en CSA-UPH (2011) con base en las recomendaciones generadas en las tablas de decisión.

Para la comparación de la biomasa estimada, cuota determinada y captura de anchoveta por temporada de pesca para la región norte-centro, fueron considerados los datos correspondientes entre 2000 y 2022. En el análisis de las cuotas asignadas en las temporadas de pesca para la región norte-centro, en los informes referentes a la situación biológica de la anchoveta y pronósticos de pesca se recomendó utilizar una tasa de explotación ( $E$ ) menor o igual a 0.35.

Finalmente, se indican los errores de observación en los actores que participan en el proceso de la asignación de la cuota de pesca en la región norte-centro. La metodología de estos errores de observación es descrita en Díaz *et al.* (en preparación) en un análisis de la evaluación del estado de conservación de la anchoveta peruana de 1950 a 2022 mediante un modelo estocástico de producción excedentaria en tiempo continuo. En ella es considerado estos errores principalmente en la metodología de los cruceros de evaluación hidroacústica y en los de biomasa desovante de la anchoveta. Este tipo de errores de observación como de procesos son muy utilizados en diversos modelos de espacio estado.

## RESULTADOS

### 3.1 Proceso en cada temporada de pesca

El proceso de evaluación para la anchoveta es difícil por la gran variabilidad del ambiente marino en diferentes escalas de tiempo, que conlleva a esporádicas y recurrentes

## METHODOLOGY

A flowchart of the process to determine the quota for a fishing season of anchoveta was elaborated (there are generally two fishing seasons in a year). This was done for both the north central and the southern regions. For decision-making regarding the total anchoveta catch quota, the situation and fishing perspectives report of anchoveta is considered for a fishing season, which is issued by Imarpe by means of their marine research. This report details the decision tables for a diversity of oceanographic and environmental scenarios, as well as the recommended environmental conditions, with exploitation rates lower than 0.35 ( $E \leq 35\%$ ). A remaining spawning biomass is considered, which would be available after the fishing season – around  $5 \times 10^6$  ton (as per reports submitted to Produce). The procedures are described in Imarpe (2020) and Oliveros-Ramos *et al.* (2021). Produce determines the total quota for the fishing season or the MPTCL described in CSA-UPH (2011) based on the recommendations in the decision tables.

To compare the estimated biomass, the established quota, and the anchoveta catches per fishing season in the north-central region, data corresponding to the 2000-2022 period were considered. As per the quotas assigned to the fishing seasons in this region, an exploitation rate ( $E$ ) lower than or equal to 0.35 was recommended in the reports related to the biological state of anchoveta and fishing forecasts.

Finally, the observation errors of the actors involved in the process of assigning the fishing quota for the north-central region were indicated. The methodology regarding these observation errors is described in Díaz *et al.* (in press), within the framework of an analysis of the conservation status of Peruvian anchoveta between 1950 and 2022, by means of a continuous-time stochastic surplus production model. Here, these errors are especially considered for the methodology employed in surveys for hydroacoustic survey and for studying the spawning biomass of anchoveta. This type of observation and process errors is very common in state-space models.

## RESULTS

### 3.1 Process in each fishing season

The anchoveta evaluation process is a difficult task due to the great variability of the marine environment in different time scales, leading to sporadic and recurrent

reorganizaciones del sistema, que impactan en los recursos, así como, en su ordenación pesquera. Para la región norte-centro, se realiza un diagnóstico de las condiciones oceanográficas en el mismo período del crucero de evaluación hidroacústica:

**i)** Si las condiciones son estables, se decide utilizar los datos y resultados del crucero; en esta situación, si es en la primavera se consideran también los datos del Crucero de Evaluación de Biomasa Desovante. **ii)** Si las condiciones son inestables; es decir, hay una alta variabilidad oceanográfica con anomalías, se decide usar los datos del crucero de evaluación anterior con un modelo de dinámica poblacional con informaciones biológicas de la flota comercial o de otras fuentes como los laboratorios costeros de Imarpe.

En ambas situaciones los datos provenientes de los cruceros de evaluación hidroacústica son proporcionada por la Dgihsa; mientras que, la evaluación por métodos indirectos es realizada por la Dgirp, que emitirán un informe situacional de la población de anchoveta y las perspectivas para la presente temporada de pesca, que contendrá las tablas de decisión con valores de biomasa con diferente esfuerzo de pesca, bajo cuatro escenarios probables. Este informe es remitido a Produce, el cual tomará la decisión de determinar la cuota total de la temporada de pesca. La decisión es determinada por la Dirección de Políticas y Ordenamiento de la Dgparpa y del Despacho Viceministerial de Pesca y Acuicultura de Produce y puede considerar un incremento como cuota social por factores socioeconómicos (Figura 1).

system reorganization, which impacts resources and fisheries management. For the north-central region, a diagnosis of the oceanographic conditions is carried out in the same period as the hydroacoustic survey:

**i)** If the conditions are stable, the data and results of the survey are used. In this case, for spring, the data of the spawning biomass survey are also considered. **ii)** If the conditions are unstable, *i.e.*, there is great oceanographic variability with anomalies, the data from the previous survey are used, as well as a population dynamics model with biological information from the commercial fleet of other sources such as Imarpe coastal labs.

In both scenarios, the data from hydroacoustic surveys are provided by the DGIHSA, while assessment via indirect methods is carried out by the DGIRP, who issue a situation and fishing perspectives report for anchoveta in the current fishing season, containing decision tables with biomass values corresponding to different fishing efforts in four probable scenarios. This report is submitted to Produce, who will decide on the total quota for the fishing season. This decision is made by the Policies and Management Directorate of Dgparpa and Produce's Vice-Minister's Office for Fishing and Aquaculture, and it may consider an increment as social quota due to socioeconomic factors (Figure 1).

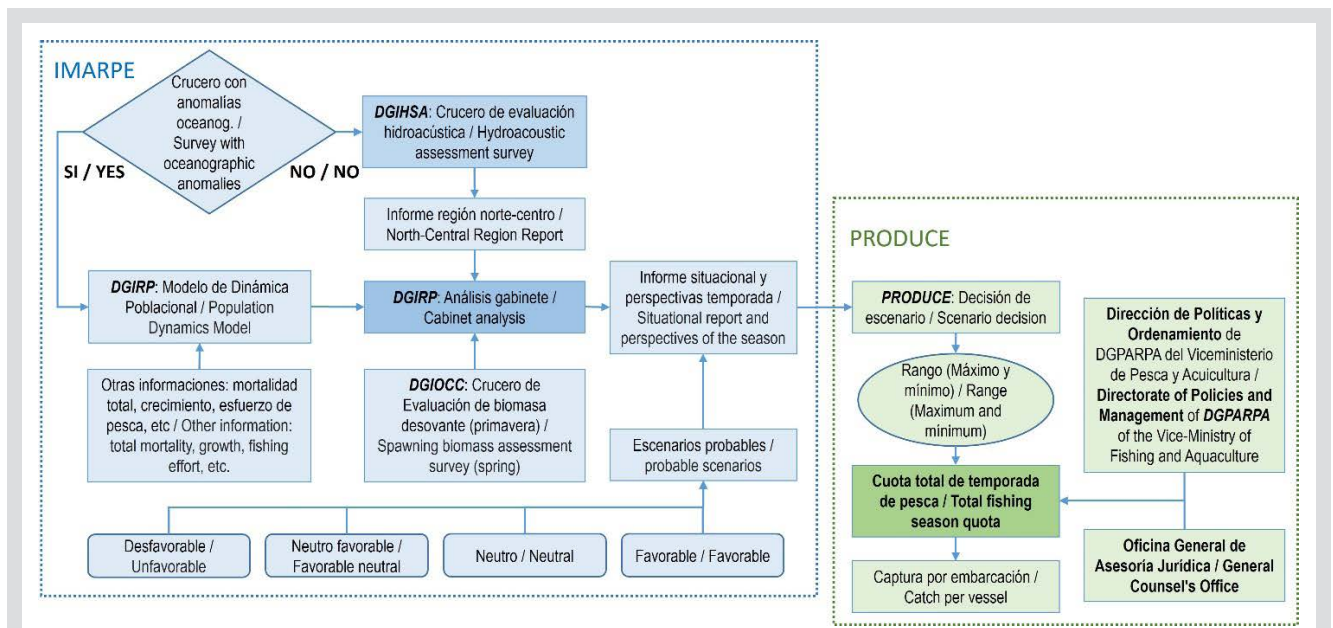


Figura 1. Diagrama del proceso para determinar la cuota de pesca de la anchoveta previa a cada temporada.

Figure 1. Process diagram to determine the anchoveta fishing quota prior to each season

Para la región sur se aplica el Modelo de Producción Excedente, cuya biomasa en esta región es altamente variable y fluctúa alrededor de su nivel de referencia de la biomasa asociada al Máximo Rendimiento Sostenible (MRS). Similar procedimiento que en la región norte-centro, Produce toma la decisión de la cuota de pesca de la temporada.

### 3.2 Decisión de la cuota de captura total de anchoveta

En los últimos cuatro años (2019-2022), las condiciones oceanográficas fueron normales a ligeramente frías, por el cual fueron consideradas condiciones neutras (Tabla 1). En todos los casos, fueron usadas las máximas tasas de explotación de 0.35; sin embargo, pueden haber sido menores.

**Tabla 1.** Tasas de explotación menores a 35 % y cuota asignada para cada probabilidad de escenario en cada temporada de pesca de la anchoveta en la región norte-centro. La cuota para E = 0.30, E = 0.32 y E = 0.35 esta expresado en millones de toneladas. En el crucero 1909-11 fue utilizado el modelo de dinámica poblacional y en el crucero 2102-04 la investigación fue realizada entre Puerto Pizarro (03°30'S) y bahía Independencia (14°15'S), considerando que la región norte-centro corresponde desde el extremo norte hasta 15°59'S.

Año / Year	Crucero / Survey	Temporada de pesca / Fishing season	Biomasa total (t) / Total biomass (tons)	Biomasa región N-C (t) / Biomass region N-C (tons)	Probabilidad de escenario / Scenario probability	Tasas de explotación (E) ≤ 35 % / Exploitation rates (E) ≤ 35 %					
						E = 0.30	Cuota (Q) / Quota	E = 0.32	Cuota (Q) / Quota	E = 0.35	Cuota (Q) / Quota
2019	1902-03	I	8825231	7003297	Desfavorable / Unfavorable	0.303	1.702	0.320	1.800	0.347	1.958
					Neutro / Neutral	0.301	1.828	0.318	1.936	0.346	2.112
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.301	1.918	0.318	2.031	0.346	2.214
					Favorable / Favorable	0.301	2.051	0.318	2.172	0.346	2.368
	1909-11	II	-	8340000	Neutro / Neutral	0.302	2.391	0.319	2.536	0.348	2.770
2020	2002-03	I	11047031	10106769	Desfavorable / Unfavorable	0.301	1.816	0.318	1.928	0.346	2.109
					Neutro / Neutral	0.301	2.076	0.318	2.202	0.346	2.407
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.302	2.280	0.320	2.423	0.349	2.654
					Favorable / Favorable	0.302	2.554	0.320	2.712	0.349	2.969
	2009-11	II	9518207	8423057	Desfavorable / Unfavorable	0.300	2.392	0.318	2.536	0.347	2.766
					Neutro / Neutral	0.300	2.488	0.318	2.636	0.347	2.874
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.300	2.530	0.318	2.685	0.347	2.934
					Favorable / Favorable	0.300	2.606	0.318	2.765	0.347	3.021

For the southern region, the surplus production model is applied, as the biomass in this region is highly variable and fluctuates around its biomass reference level, associated to the maximum sustainable yield (MSY). Similarly to the procedure in the north-central region, Produce decides the season's fishing quota.

### 3.2 Decision on the total anchoveta catch quota

In the last four years (2019-2022), oceanographic conditions ranged from normal to mildly cold, which is why they were regarded as neutral (Table 1). In all cases, a maximum exploitation rate of 0.35 was used. However, this value could have been lower.

**Table 1.** Exploitation rates lower than 35 % and quota assigned for each scenario in each anchoveta fishing season in the north-central region. The quota for E = 0.30, E = 0.32, and E = 0.35 is expressed in million tons. In the 1909-11 survey, the population dynamics model was used, and, in the 2102-04 survey, research was carried between Puerto Pizarro (03°30'S) and Bahía Independencia (14°15'S), considering that the north-central region spans from 03° 33'S to 15°59'S.

Año / Year	Cruceiro / Survey	Temporada de pesca / Fishing season	Biomasa total (t) / Total biomass (tons)	Biomasa región N-C (t) / Biomass region N-C (tons)	Probabilidad de escenario / Scenario probability	Tasas de explotación (E) ≤ 35 % / Exploitation rates (E) ≤ 35 %					
						E = 0.30	Cuota (Q) / Quota	E = 0.32	Cuota (Q) / Quota	E = 0.35	Cuota (Q) / Quota
2021	2102-04	I	9880665	9880665	Desfavorable / Unfavorable	0.300	2.358	0.316	2.494	0.348	2.755
					Neutro / Neutral	0.300	2.564	0.316	2.711	0.348	2.993
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.301	2.713	0.318	2.872	0.346	3.129
					Favorable / Favorable	0.301	2.904	0.318	3.073	0.346	3.347
	2109-11	II	8032349	7007899	Desfavorable / Unfavorable	0.300	1.520	0.318	1.614	0.347	1.766
					Neutro / Neutral	0.300	1.660	0.318	1.762	0.347	1.927
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.300	1.759	0.318	1.869	0.347	2.047
					Favorable / Favorable	0.300	1.889	0.318	2.007	0.347	2.199
2022	2202-04	I	10209811	9780370	Desfavorable / Unfavorable	0.302	1.906	0.319	2.017	0.346	2.198
					Neutro / Neutral	0.302	2.149	0.319	2.275	0.346	2.477
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.303	2.344	0.321	2.484	0.348	2.710
					Favorable / Favorable	0.303	2.603	0.321	2.758	0.348	3.010
	2209-11	II	7184272	6841182	Desfavorable / Unfavorable	0.300	1.733	0.318	1.838	0.347	2.009
					Neutro / Neutral	0.300	1.873	0.318	1.987	0.347	2.170
					Neutro-favorable / Neutral-favorable	0.300	1.964	0.318	2.086	0.347	2.283
					Favorable / Favorable	0.300	2.085	0.318	2.214	0.347	2.422

La cuota (Q) esta expresada en  $1000 \times 10^6$  toneladas.

The quota (Q) is expressed in  $1000 \times 10^6$  tons.

### 3.3 Comparación de biomasa estimada, cuota determinada y captura de anchoveta por temporada de pesca en la región norte-centro

Las biomásas estimadas por la metodología hidroacústica han sido variables, obteniéndose la mayor biomasa en el verano de 2013 (cruceiro 1302-04) con  $12.13 \times 10^6$  ton y la menor biomasa fue obtenida en la primavera de 2009 (cruceiro 0912 entre Salaverry-Atico) con  $1.80 \times 10^6$  ton. Generalmente, las mayores biomásas fueron encontradas en los veranos y en los últimos años (2018-2022); han mostrado cierta estabilidad en  $8.05 \times 10^6$  ton, se visualiza un stock remanente considerable con respecto a las capturas por la flota industrial y artesanal. Las capturas

### 3.3 Comparison of the estimated biomass, the established quota, and the anchoveta catch per fishing season in the north-central region

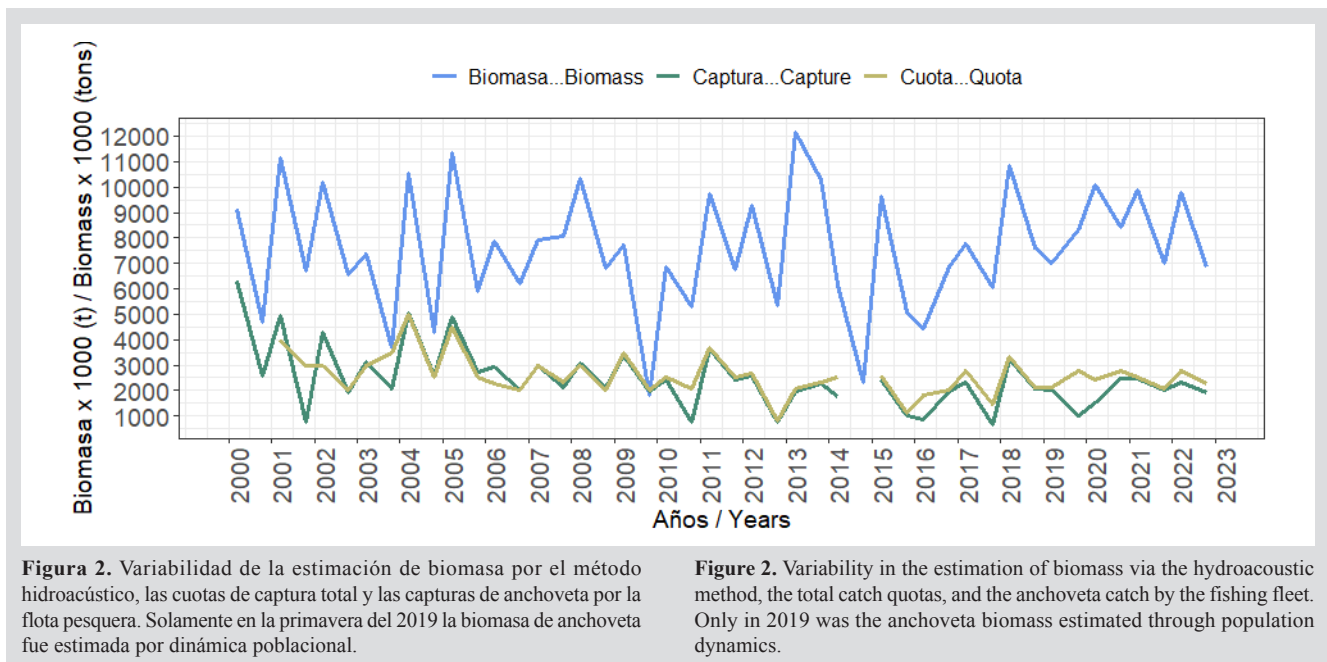
The biomass estimated via the hydroacoustic methodology has been variable, with the highest values obtained in summer 2013 (1302-04 survey), *i.e.*,  $12.13 \times 10^6$  ton; and the lowest value obtained in spring 2009 (0912 survey between Salaverry and Atico), *i.e.*,  $1.80 \times 10^6$  ton. In general terms, the highest biomass values were found in summer, and, in recent years (2018-2022); they have shown a certain stability around  $8.05 \times 10^6$  ton. A considerable remaining stock is observed with regard to the catch by the industrial and artisanal fleet. Anchoveta catches by the

de pesca de la anchoveta por la flota pesquera han mostrado altos porcentajes con respecto a las cuotas de captura, desde la primavera de 2002 (II temporada de pesca de 2002) hasta la primavera de 2022 (II temporada de pesca de 2022); a excepción, de las segundas temporadas de pesca de 2001, 2010, 2017 y 2019, cuyos porcentajes fueron menores a 50 %. Las razones se debieron fundamentalmente a las migraciones de la anchoveta (horizontal y vertical) como consecuencia de la variabilidad ambiental producida principalmente por las ondas Kelvin ecuatoriales.

En la primavera de 2014 (crucero 1411-12) la biomasa fue estimada en  $4.57 \times 10^6$  ton; en el cual no hubo temporada II de pesca. Así mismo, hay una leve tendencia decreciente de las cuotas de pesca y capturas por la flota pesquera comparados con 2000-2006 (Figura 2).

fishing fleet have shown high percentages with respect to the catch quotas between spring 2002 (fishing season II of 2002) and spring 2022 (fishing season II of 2022), except for the second fishing seasons of 2001, 2010, 2017, and 2019, with values lower than 50 %. This is fundamentally due to migrations of anchoveta (horizontal and vertical) because of the environmental variability caused by equatorial Kelvin waves.

In spring 2014 (survey 1411-12), the estimated biomass was  $4.57 \times 10^6$  ton; at this time, there was no fishing season II. Moreover, there is a slightly decreasing tendency in the fishing quotas and the catches by the fishing fleet in comparison with the 2000-2006 period (Figure 2).



### 3.4 Análisis de las cuotas asignadas en las temporadas de pesca de la anchoveta entre 2019 y 2022, para la región norte-centro

La probabilidad del escenario ambiental en estos años fue de condición neutra, no hubo eventos anómalos cálidos significativos que alteraran el comportamiento normal de la anchoveta. En las tablas de decisión se contempla tasas de explotación también tasas menores a 0.35, en la cual los gestores pueden considerarlo como una medida precautoria. Pero, también se puede considerar un incremento o una cuota social a los pescadores e industrias pesqueras; así como, un aporte económico al estado.

### 3.4 Analysis of the quotas assigned to the anchoveta fishing seasons between 2019 and 2022 for the north-central region

The likelihood of these years' environmental scenario corresponded to neutral conditions. There were no significant anomalous warm events that altered the normal behavior of anchoveta. The decision tables also show exploitation rates lower than 0.35, which may be regarded by managers as a precautionary measure. Nevertheless, an increment or a social quota for the fishermen and fishing industries can be considered, as well as an economic contribution to the state.

Entre 2019-2022, se aplicaron dos decisiones: **i)** una decisión precautoria, aplicado en la I temporada de pesca de 2021 con una biomasa menor en  $484 \times 10^3$  ton, II temporada de pesca de 2020 con una biomasa menor en  $94 \times 10^3$  ton y en la I temporada de pesca de 2019 con una biomasa menor en  $12 \times 10^3$  ton, **ii)** una decisión máxima, aplicados en la I temporada de pesca de 2022 con un incremento de  $315 \times 10^3$  ton, II temporada de pesca de 2021 con un incremento de  $120 \times 10^3$  ton, II temporada de pesca de 2022 con un incremento de  $113 \times 10^3$  ton, II temporada de pesca de 2019 con un incremento de  $16 \times 10^3$  ton y en la I temporada de pesca de 2020 con un incremento de  $6 \times 10^3$  ton (Tabla 2).

Between 2019 and 2022, two decisions were made: **i)** a precautionary one in fishing season I of 2021, with a  $484 \times 10^3$  ton lower biomass, in fishing season II of 2020, with a  $94 \times 10^3$  ton lower biomass, and in fishing season I of 2019, with a  $12 \times 10^3$  ton lower biomass; **ii)** a maximum one in fishing season I of 2022, with an increment of  $315 \times 10^3$  ton, in fishing season II of 2021, with an increment of  $113 \times 10^3$  ton, in fishing season II of 2019, with an increment of  $16 \times 10^3$  ton, and in fishing season I of 2020, with an increment of  $6 \times 10^3$  ton (Table 2).

**Tabla 2.** Cuotas asignadas a las temporadas de pesca en la región-centro entre los años 2019-2022, donde E es la tasa de explotación con (0.35).

**Table 2.** Quotas assigned to the fishing seasons of the north-central region between 2019 and 2022, where E is the exploitation rate (0.35)

Temporada de pesca / Fishing season	Crucero / Survey	E = 0.35	Biomasa (toneladas) / Biomass (tons)		
			Recomendación / Recommendation	Cuota asignada / Allocated quota	Diferencia / Difference
I-2019	1902-03	0.346	2112000	2100000	- 12000
II-2019	1909-11	0.348	2770000	2786000	16000
I-2020	2002-03	0.346	2407000	2413000	6000
II-2020	2009-11	0.347	2874000	2780000	- 94000
I-2021	2102-04	0.348	2993000	2509000	- 484000
II-2021	2109-11	0.347	1927000	2047000	120000
I-2022	2202-04	0.346	2477000	2792000	315000
II-2022	2209-11	0.347	2170000	2283000	113000

### 3.5 Errores de observación en los actores que participan en el proceso de la asignación de la cuota de pesca en la región norte-centro

En el proceso de la determinación del LMCTP o cuota total permisible de la anchoveta en la región norte-centro para la II temporada de pesca de cada año intervienen cinco actores o procesos, iniciados por los: i) resultados del crucero de biomasa desovante de la anchoveta, ii) resultados del crucero de evaluación hidroacústica (en ambos cruceros las mediciones de las muestras son directas), iii) Análisis de gabinete, iv) Tabla de decisión (en el análisis de gabinete se puede considerar el proceso de las tablas de decisión) y v) Dirección de Políticas y Ordenamiento. En la I temporada de pesca no se considera los cruceros de biomasa desovante. En el caso de la aplicación del método de balance poblacional, no se considera los datos acústicos del crucero de evaluación hidroacústica, como lo realizado en la II temporada de pesca de 2019, fueron utilizados los datos del crucero anterior; es decir, del verano de 2019.

### 3.5 Observation errors made by the actors involved in the process of assigning fishing quotas to the north central region

In determining the MPTCL or the total permissible quota for anchoveta in fishing season II of each year for the north-central region, five actors or processes are involved, considering i) the results of the anchoveta spawning biomass survey, ii) the results of the hydroacoustic survey (in both surveys, sample measurement is direct), iii) a cabinet analysis, iv) a decision table (in the cabinet analysis, the process involving the decision tables may be considered), and v) the Policies and Management Directorate. For fishing season I, the spawning biomass surveys are not considered. As for the application of the population balance method, the data from the hydroacoustic survey are not considered, as was done for fishing season II of 2019, where data from the previous survey were used (*i.e.*, from summer 2019).

El Índice de Capturabilidad en el crucero de evaluación de biomasa desovante por el método de producción de huevos es de 0.15 con un error de observación de 0.10; mientras que, en el crucero de evaluación hidroacústica es de 0.10 con un error de observación de 0.10. Estos valores son casi similares porque las metodologías de observación dada por los equipos acústicos en ambos cruceros son iguales en los diseños de muestreo (sistemáticos). Similar situación sucede con los límites de confianza de los valores NASC o de integración que oscilan entre 12 y 25 %, siendo los más bajos en los cruceros de verano y los más altos en los cruceros realizados en invierno y primavera en otras estaciones, debido a la amplia dispersión en estas estaciones del año.

En el análisis de gabinete la incertidumbre o errores están incluidos en los riesgos que se recomiendan en la tabla de decisión. La ventaja es que en este proceso los resultados son casi similares a los obtenidos en los cruceros de investigación, y los datos considerados en los análisis son los obtenidos en las actividades de investigación del Imarpe y por la flota industrial.

El balance es un modelo que parte de la observación acústica anterior, el error es mayor cuando la observación acústica es mayor. Otros sesgos o errores menores son los datos provenientes de las actividades de investigación de seguimiento de la pesquería y de la flota pesquera. Finalmente, La Dirección de Políticas y Ordenamiento, también genera sesgos menores a 10 % obtenidos con el incremento de cuotas consideradas como sociales y económicas (Tabla 3).

**Tabla 3.** Sesgos en los actores o procesos para la determinación de las cuotas de pesca en la región norte-centro

	Actores / Actors	Medición de datos / Data measurement	Tipo de datos / Data type	Índice de capturabilidad / Catchability index	Error de observación del índice / Observation error Index
Imarpe	Aplicación del método de biomasa desovante / Application of spawning biomass method	Directo / Direct	Cuantitativo / Quantitative	1 (0.15)	0.10 (0.15)
	Aplicación del método hidroacústico / Application of the hydroacoustic method	Directo / Direct	Cuantitativo / Quantitative	1 (0.10)	0.10 (0.15)
	Análisis de gabinete / Cabinet analysis	Indirecto / Indirect	Cuantitativo / Quantitative	Dependiente / Dependent	Dependiente / Dependent
	Aplicación del método de balance poblacional / Application of the population balance method	Indirecto / Indirect	Cuantitativo / Quantitative	Dependiente / Dependent	Dependiente / Dependent
	Tabla de decisión / Decision table	Indirecto / Indirect	Cuantitativo / Quantitative	Dependiente / Dependent	Dependiente / Dependent
Produce	Dirección de Políticas y Ordenamiento Dgparpa / Directorate of Policies and Management Dgparpa	Indirecto / Indirect	Cuantitativo / Quantitative	-	> 10 %

Dependiente, se refiere a la dependencia de los datos utilizados.

The catchability index provided by the spawning biomass survey, as obtained via the EPM, was 0.15, with an observation error of 0.10. Meanwhile, the value reported by the hydroacoustic survey was 0.10, with an observation error of 0.10. These values are almost similar because the observation methodologies involved in the use of the acoustic equipment of both surveys are equal in the sampling designs (systematic). Something similar occurs with the confidence limits of the NASC (integration values), which oscillate between 12 and 25 %, with the lowest values reported for the summer surveys and the highest for those carried out in winter and spring.

The cabinet analysis includes uncertainty or errors in the risks recommended in the decision table. The advantage is that, during this process, the results are almost similar to those obtained in the research surveys, and the data considered in the analyses are those obtained during the research activities of Imarpe and the industrial fleet.

The result is a population balance model that starts from the previous acoustic observation (previous acoustic survey), the error in the biomass estimation is greater when the acoustic observation has greater variability due to the dispersion of the schools. Other biases or minor errors are the data from the monitoring activities carried out by fisheries and the fishing fleet. Finally, the Policies and Management Directorate also generates biases lower than 10 %, which are obtained through the increase in the quotas regarded as social and economic (Table 3).

**Table 3.** Biases in the actors or processes involved in determining the fishing quotas for the north-central region.

Dependent, refers to the dependence on the data used.



El proceso de evaluación de la anchoveta consiste en un método jerárquico; es decir, al final de la tabla de decisión ya contempla toda la incertidumbre asociada a cada etapa del proceso. Estimar un porcentaje de error para la tabla de decisión, sería sumar todo el error desde la estimación de biomasa acústica hasta las proyecciones, por el cual la metodología para tener estimados de error en cada etapa del proceso estaría ampliamente sesgada.

## DISCUSION

Las resoluciones ministeriales son emitidas por Produce que autorizan el inicio de la temporada de pesca, se indica que está dirigido a las especies anchoveta y anchoveta blanca o samasa (*Anchoa nasus*), cuyas abundancias de esta última especie en los cruceros de evaluación hidroacústica realizados por Imarpe han sido mínimas, localizadas generalmente en la zona norte, en áreas aisladas y cercanas a la costa, tanto para la región norte-centro como para la sur.

En el proceso para determinar el LMTCP o cuota total permisible intervienen varios grupos de investigadores multidisciplinarios de Imarpe; así como, profesionales y gestores de la administración pesquera de Produce. Este mecanismo de engranaje de los investigadores de las diversas áreas de investigación del Imarpe ha permitido a través de los años contribuir en la sostenibilidad de la abundancia de la anchoveta y el reconocimiento mundial como el mejor país en el manejo de sus recursos pesqueros, de un total de 53 países realizado por la Universidad de British Columbia de Canadá (Diario La República, 2009). Sin embargo, esta regulación pesquera puede estar afectada por cambios anómalos cálidos que alteran el ecosistema marino produciéndose migraciones horizontales y/o verticales, como lo ocurrido en la II temporada de pesca del 2019; Castillo *et al.* (2021a) determinaron eventos ambientales por la presencia de una onda Kelvin cálida y eventos biológicos por el fuerte reclutamiento y migración vertical cerca del fondo de los ejemplares adultos.

La decisión de la tasa de explotación y de la probabilidad del escenario ambiental por Produce, también requiere de gestores con amplio conocimiento para optar una decisión acertada. Las autoridades temporales del Ministerio de la Producción deberían de priorizar la sostenibilidad ecosistémica y el crecimiento económico del país. Castillo *et al.* (2020 y 2021b) mencionaron que la abundancia de la anchoveta en 2019 y 2020 se encontró en condiciones saludables con mayor abundancia en la zona pelágica

The anchoveta evaluation process consists of a hierarchical model, *i.e.*, at the end of the decision table, it already contemplates all the uncertainties associated with each stage of the process. Estimating a percent error for the decision table would mean summing the whole error, from the acoustic biomass estimation to the projections made, which would represent a wide bias in the methodology for obtaining error estimates at each stage of the process.

## DISCUSSION

The ministerial resolutions issued by Produce that authorize the beginning of the fishing season are aimed at the anchoveta and the white anchovy or *samasa* (*Anchoa nasus*). The abundance of the latter, as per the hydroacoustic surveys carried out by Imarpe, has been minimal. This species has been generally reported in the northern zone, in isolated areas near the coast, both in the north-central and the southern region.

The process followed to determine the MPTCL or the total permissible quota involves several groups of multidisciplinary researchers at Imarpe, as well as administrative professionals from Produce. Over the years, this gearwork of Imarpe researchers in different areas has allowed to contribute to the sustainability of anchoveta abundance and Peru's global recognition as the country with the best management of its fishing resources among a total of 53 countries, as per a study carried out by the University of British Columbia (Diario La República, 2009). However, this fishing regulation may be affected by anomalous warm changes that alter the marine ecosystem, causing horizontal and/or vertical migrations, as occurred in fishing season II of 2019. Castillo *et al.* (2021a) determined the environmental events generated by the presence of a warm Kelvin wave, in addition to biological events due to strong recruitment and vertical migration of adult specimens near the bottom.

Produce's decision on the exploitation rate and the likelihood of the environmental scenario also requires managers with great knowledge to take sound measures. The Ministry of Production's temporary authorities should prioritize ecosystem sustainability and the country's economic growth. Castillo *et al.* (2020 and 2021b) mentioned that the abundance of anchoveta in 2019 and 2020 showed healthy conditions, with higher values in the neritic pelagic zone, and that the variability in its distribution was due to oceanographic conditions, mainly

nerítica y que la variabilidad de su distribución se debió a las condiciones oceanográficas, principalmente por la salinidad en la capa superficial y por el oxígeno a nivel vertical.

Generalmente, las recomendaciones de Imarpe para las cuotas de pesca fueron generadas por los cruceros de evaluación hidroacústica, y que se aplicaron desde 1983 a la fecha; a excepción de la II temporada de pesca de 2019, que fue realizado por el modelo de balance poblacional y que posteriormente el resultado de la biomasa fue confirmado por Castillo *et al.* (2022) con diversas técnicas de procesamiento para las frecuencias de 120 y 38 kHz. Las cuotas en cada temporada de pesca desde 1983 a la fecha se han mejorado a través del tiempo contando con mayores informaciones como: bitácoras electrónicas, seguimiento satelital, presencia de inspectores a bordo, política de las empresas pesqueras en el marco de la sostenibilidad, período de desove, entre otros, herramientas que permiten inmediatamente el cierre temporal de áreas, principalmente para evitar un mayor porcentaje de captura de ejemplares juveniles a lo permitido.

Otro aspecto para considerar en las segundas temporadas de pesca, especialmente en los últimos años, es que los porcentajes de las capturas no son altas o no se cumplen totalmente, debido a las condiciones oceanográficas frías, que produjeron una amplia dispersión de la anchoveta, constituidos principalmente por cardúmenes de menores dimensiones morfométricas y energéticas, y que no son atractivas para los patrones de pesca de la flota industrial. La localización de una fracción de estos cardúmenes en áreas alejadas de la costa por la dispersión constituye un inconveniente para el cumplimiento de la cuota asignada.

Los errores de observación determinados por los actores en el proceso de obtención del LMTCP son mayores en las estaciones de invierno y primavera, debido a que la población de anchoveta se encuentra en áreas alejadas de la costa y algunas veces no se realiza los muestreos adecuados en esta zona. El alejamiento de la costa de la población de anchoveta requiere también que la estrategia de los muestreos sea rápida, para evitar la sobreestimación o subestimación por las migraciones horizontales; por lo cual, es recomendable utilizar dos o más embarcaciones para su investigación. Lo contrario, sucede en el verano cuando la población de anchoveta se acerca hacia la costa, y los muestreos son adecuados, reduciendo los sesgos e incertidumbre.

Finalmente, en todo el proceso de recomendaciones para la determinación de una cuota de pesca para la anchoveta en la región norte-centro intervienen diferentes componentes que muestran resultados coherentes con la actualidad en

to salinity in the surface layer and oxygen at the vertical level.

Generally, Imarpe's recommendations for fishing quotas have been based on hydroacoustic surveys since 1983, with the exception of those of fishing season II of 2019, which considered a model of population balance. The biomass results were later confirmed by Castillo *et al.* (2022) using diverse processing techniques for the 120 and 38 kHz frequencies. The quotas of each fishing season since 1983 have been improved over time, as there is more information available, such as electronic logs, satellite monitoring, the on-board presence of inspectors, and fishery policies framed within the concept of sustainability and the spawning period, among others. This information allows immediately issuing provisions for the temporary closure of fishing areas, avoiding a higher percentage of juvenile catches.

Another aspect to consider about the second fishing seasons, especially in recent years, is that the catch percentages are not high or are not completely reached due to cold oceanographic conditions, which have caused a wide dispersion of anchoveta, represented by schools of smaller morphometric and energy dimensions. These are not attractive for the industrial fleet's fishing patterns. The location of a fraction of these schools in areas far from the coast (which is due to dispersion) constitutes an inconvenience in fulfilling the assigned quota.

The observation errors of the actors involved in the process of obtaining the MPTCL are greater in winter and spring, as the anchoveta population is in areas far from the coast and adequate sampling of these zones is sometimes not performed. The population's distancing from the coast also requires a fast-sampling strategy, in order to avoid over- or underestimation due to horizontal migration. Therefore, we recommend using two or more vessels for research activities. The opposite occurs in summer, when the anchoveta population comes near the coast and sampling is adequate, reducing bias and uncertainty.

Finally, different components intervene throughout the recommendation process for determining an anchoveta fishing quota in the north-central region, showing results that are coherent with the current situation in each fishing period and that have allowed maintaining ecosystem sustainability in recent decades. Imarpe is currently undergoing an international certification process regarding its research, which will allow for greater credibility and

cada etapa y que han permitido a través de estas décadas mantener una sostenibilidad ecosistémica. Actualmente, el Imarpe está en proceso de certificación internacional de las investigaciones que realiza, el cual permitirá una mayor credibilidad y confiabilidad; lo que sí es recomendable es que los gestores de la pesca sean profesionales especializados para entender la dinámica ambiental del sistema de la Corriente de Humboldt, que influye en la población de la anchoveta.

## CONCLUSIONES

Para recomendar la cuota de captura en la región norte-centro se requiere cumplir con las siguientes etapas; **i)** el uso de cruceros de evaluación hidroacústica como observaciones directas en tiempo casi real como condición inicial para la proyección de las capturas; **ii)** inclusión de la variabilidad ambiental en las proyecciones, utilizando parámetros poblacionales variable para diferentes escenarios ambientales según las mejores previsiones disponibles sobre el estado del ecosistema.

Para recomendar la cuota de captura en la región sur se aplica el modelo de producción excedente, en tiempo continuo y la decisión está basada en el MRS.

El Imarpe recomienda para la región norte-centro una tasa de explotación menor o igual a 0.35 mediante una tabla de decisión para cuatro probables escenarios de ambiente oceanográfico, considerando una biomasa remanente para asegurar su sostenibilidad. Entre 2019 y 2022 las condiciones fueron neutras.

El cumplimiento de las capturas de anchoveta en las primeras temporadas de pesca ha sido alto (mayores a 90 %); mientras que, en las segundas temporadas de pesca fueron menores a 50 % como lo registrado en 2001, 2010, 2017 y 2019.

En la decisión de la cuota de la temporada de pesca entre 2019 y 2022, se consideraron dos decisiones, una decisión precautoria con biomasa menor a la tabla de decisión (I-2021, II-2020, I-2019) y una decisión máxima con un incremento a la biomasa atribuida a la cuota social y económica (I-2022, II-2021, II-2022, II-2019 y I-2020).

En cada proceso o etapa para la determinación de la cuota de pesca existe un error de observación, como cualquier metodología de investigación, el mayor error ocurre en el invierno y primavera por el alejamiento de la costa de la población de anchoveta, y el menor error ocurre en el verano cuando la población de anchoveta se acerca hacia la costa.

reliability. What is indeed advisable is for fishery managers to be professionals specialized in understanding the environmental dynamics of the Humboldt current system, which influences the population of anchoveta.

## CONCLUSIONS

To make recommendations on the catch quota for the north-central region, the following conditions must be fulfilled: **i)** the use of hydroacoustic surveys, direct observation methods in almost real time, as an initial condition for catch projections; **ii)** the inclusion of environmental variability in the projections, using variable population parameters for different scenarios according to the best forecasts available regarding the state of the ecosystem.

To recommend a catch quota in the southern region, the surplus production model is applied in continuous time, and the decision is based on the MSY.

For the north-central region, Imarpe recommends an exploitation rate lower than or equal to 0.35, by means of a decision table for both probable oceanographic environment scenarios, considering a remaining biomass to ensure sustainability. Between 2019 and 2022, the conditions were neutral.

The fulfillment of the catch quotas in the first fishing seasons has been high (more than 90 %), whereas, in the second fishing seasons, values lower than 50 % were reported, as in 2001, 2010, 2017, and 2019.

The decision regarding the quotas for the fishing seasons between 2019 and 2022 considered two measures: a precautionary one, with a biomass lower to that in the decision table; and a maximum use, with an increase in biomass attributed to a social and economic quota (I-2022, II-2021, II-2022, II-2019, and I-2020).

In each process or stage for determining the fishing quota, there is an observation error, as in any research methodology. The highest error is observed in winter and spring because the anchoveta population distances itself from the coast, and the lowest error occurs in summer when the population comes near it.

It is recommended for fishery managers to be professionals suited to understanding the marine dynamics influencing the abundance and behavior of anchoveta.

Es necesario que los gestores de la pesca sean profesionales adecuados para entender la dinámica marina que influye en la abundancia y comportamiento de la anchoveta, para tomar decisiones responsables.

## AGRADECIMIENTOS

Un reconocimiento especial a todo el personal que participó en los cruceros de investigación del Imarpe realizados entre 2020 y 2021, y por el apoyo logístico para la realización de estas actividades a pesar de las dificultades de la pandemia del COVID-19.

## ACKNOWLEDGMENTS

Special thanks to all the personnel participating in the Imarpe research surveys carried out between 2020 and 2021, as well as for the logistic support provided during these activities, despite the difficulties caused by the COVID-19 pandemic.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Agüero, M (ed). 2007. Capacidad de pesca y manejo pesquero en América y el Caribe. Doc. Técn. Pesca FAO, Roma. 403 p.
- Aranda, M. 2009. Developments on fisheries management in Peru: The new individual vessel quota system for the anchoveta fishery. *Fish. Res.*, 96: 308–312. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.11.004>
- Arias Schreiber, M., M. Ñiquen and M. Bouchon. 2011. Coping strategies to deal with environmental variability and extreme climatic events in the Peruvian anchovy fishery. *Sustainability*, 3: 823-846. <https://doi.org/10.3390/su3060823>.
- Ayón, P., B. Buitrón y S. Guzmán. 2001. Biomasa desovante del stock norte-centro de la anchoveta peruana estimada por el método de producción de huevos en invierno 2000. *Inf. Imarpe*, 162.
- Bakun, A. and S.J. Weeks. 2008. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold?. *Prog. Oceanogr.*, 79: 290 – 299. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.027>
- Bertrand, A., M. Segura, M. Gutiérrez and L. Vásquez. 2004. From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish Fish.*, 5: 296–316. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x>
- Bertrand, A., F. Gerlotto, S. Bertrand, M. Gutiérrez, L. Alza, A. Chipollini, E. Díaz, P. Espinoza, J. Ledesma and R. Quesquén. 2008. Schooling behaviour and environmental forcing in relation to anchoveta distribution: An analysis across multiple spatial scales. *Prog. Oceanogr.*, 79, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.018>
- Bouchon, M. 2018. La pesquería de anchoveta en el Perú. Tesis Doct. Cienc. del Mar y Biol. Apl., Univ. Alicante, España. 131 p.
- Castillo, P.R., S. Peraltilla, A. Aliaga, M. Flores, M. Ballon, J. Calderón y M. Gutiérrez. 2011. Protocolo técnico para la evaluación acústica de las áreas de distribución y abundancia de recursos pelágicos en el mar peruano. Versión 2009. *Bol. Imarpe*, 36 (1-2): 7–28.
- Castillo, R., L. Dalla Rosa, W. García Díaz, L. Madureira, M. Gutiérrez, L. Vásquez and R. Koppelman. 2019. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fish. Oceanog.*, 28: 389–401. <https://doi.org/10.1111/fog.12419>
- Castillo, R, R. Cornejo, L. La Cruz, D. Grados, G. Cuadros, C. Valdez y M. Posada. 2020. Distribución y biomasa de recursos pelágicos neríticos y oceánicos en el ecosistema marino peruano obtenidos de los cruceros hidroacústicos en el 2019. *Bol. Imarpe*, 35(2): 213-241.
- Castillo, P.R., M. Ñiquen, L. La Cruz, R. Guevara-Carrasco and G. Cuadros. 2021a. Migration behavior of anchoveta (*Engraulis ringens*) in the northern Humboldt Current System between September 2019 and September 2020. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 49: 702-716. <http://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2669>
- Castillo, R, R. Cornejo, L. La Cruz, D. Grados, G. Cuadros, C. Valdez, A. Paz y M. Pozada. 2021b. Abundancia de anchoveta (*Engraulis ringens*) y otras especies pelágicas estimadas por el método hidroacústico en el ecosistema marino peruano en el 2020. *Inf. Imarpe*, 48(3): 327-349.
- Castillo, P.R., L. La Cruz., D. Grados, R. Cornejo, R. Guevara-Carrasco and J. Csirke. 2022. Anchoveta (*Engraulis ringens*) Biomass in the Peruvian marine ecosystem estimated by various hydroacoustic methodologies during Spring of 2019: A recent study. *J Mar Biol Oceanogr* 9:35-55. <https://doi.org/10.9734/bpi/nvbs/v8/2118E>
- Chavez, F. and M. Messié. 2009. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystem. *Prog. Oceanogr.* 83:80-96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>



- CSA–UPCH. 2011. Evaluación de los sistemas de gestión pesquera en el marco de la certificación a cargo del Marine Stewardship Council. La pesquería peruana de anchoveta. UPCH, Lima. 160 p.
- D.S. 066. 1966. Cuota de captura de anchoveta para todo el litoral peruano. El Peruano. Normas Legales.
- Decreto Ley N° 1084. 2008. Ley sobre límites máximos de captura por embarcación. 28 de junio 2008. Diario Oficial El Peruano, Normas Legales: 375089 – 375101. <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/DecretosLegislativos/01084.pdf>
- Diario La República, 2009 Redacción LR, Reconocen al Perú como el mejor en manejo de sus recursos pesqueros. 31 marzo, links: <https://larepublica.pe/economia/389879-reconocen-a-peru-como-el-mejor-en-manejo-de-sus-recursos-pesqueros>.
- Díaz, E. y R. Oliveros. 2015. Protocolo estimación de la captura total permisible del stock sur de la anchoveta peruana. Edición 01. Imarpe-DGIRP. 3 p.
- Díaz, E., E. Quispe and P. Marin. 2015. Assessing the conservation status of the Peruvian anchoveta *Engraulis ringens* from 1950 to 2022 using a stochastic surplus production model in continuous-time. In press.
- Espino, M. 2014. Patrones de variabilidad ambiental y las pesquerías en el Pacífico Sud Este. Tesis Doctorado en Cienc. Biol., Univ. Nac. Mayor de San Marcos. Lima. 147 p.
- Imarpe. 2012. Proyecciones de pesca de anchoveta en la región Norte-Centro (Temporada noviembre 2012–enero 2013). Inf. Imarpe, 9 p.
- Imarpe. 2014a. Situación actual del stock Norte-Centro de la anchoveta peruana y perspectivas de explotación para el período abril-julio 2014. Inf. Imarpe, 9 p.
- Imarpe. 2014b. Situación del stock Norte-Centro de la anchoveta peruana a octubre del 2014. Inf. Imarpe, 45 p.
- Imarpe. 2015. Informe complementario sobre la situación del stock Norte-Centro de la anchoveta peruana a noviembre del 2015. Inf. Imarpe, 37 p.
- Imarpe. 2016. Informe situación del stock Norte-Centro de la anchoveta peruana al 01 de noviembre de 2016 y alternativas de explotación para la segunda temporada de pesca 2016. Inf. Imarpe, 34 p.
- Imarpe. 2020. Protocolo “Elaboración de la tabla de decisión para la determinación del límite máximo de captura total permisible por temporada de pesca en la pesquería del stock Norte-Centro de la anchoveta peruana. Edición 05. Setiembre 2020. <https://www.gob.pe/institucion/imarpe/informes-publicaciones/1202194-elaboracion-de-la-tabla-de-decision-para-la-determinacion-del-limite-maximo-de-captura-total-permisible-por-temporada-de-pesca-en-la-pesqueria-del-stock-norte-centro-de-la-anchoveta-peruana>.
- Joo, R., A. Bertrand, M. Bouchon, A. Chaigneau, H. Demarcq, J. Tam, M. Simier, D. Gutiérrez, M. Gutiérrez, M. Segura, R. Fablet and S. Bertrand. 2014. Ecosystem scenarios shape fishermen spatial behavior. The case of the Peruvian anchovy fishery in the Northern Humboldt Current System. Prog. Oceanogr., 128, 60–73.
- Mathisen, O. 1989. Adaptation of the anchoveta (*Engraulis ringens*) to the Peruvian upwelling system: 220-234. In: The Peruvian upwelling ecosystem: dynamics and interactions. Iclarm Conf. Proc., Imarpe, Callao.
- Monteferrí, B., C. Scheske y S. De la Puente. 2020. Anchoveta. <https://www.mardelperu.pe/pesca/10/pesqueria-anchoveta> [15/04/2023].
- Monteferrí, B., K. Zarbe, M. Mitma, R. Bandín, C. Heck y C. Guidino. 2021. Reglas de juego en el sector pesca. <https://www.mardelperu.pe/pesca/3/reglas-de-juego-en-el-sector-pesca> [15/04/2023].
- Morón, G., P. Galloso, D. Gutiérrez and J. Torrejón-Magallanes. 2019. Temporal changes in mesoscale aggregations and spatial distribution scenarios of the Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*). Deep Sea Res. 2 Top Stud. Oceanogr., 159: 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.11.009>
- Nixon, S. and A. Thomas. 2001. On the size of the Peru upwelling ecosystem. Deep Sea Res 1 Oceanogr. Res. Pap., 48, 2521-2528. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00023-1)
- Ñiquen, M., M. Bouchón, S. Cahuín y E. Díaz. 2000. Pesquería de anchoveta en el mar peruano: 1950–1999. Bol. Inst. Mar Perú, 19: 117–123.
- Oliveros-Ramos, R., M. Ñiquen, J. Csirke and R. Guevara-Carrasco. 2021. Management of the Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*) fishery in the context of climate change. 237-244. In: Bahri, T., M. Vasconcellos, D.J. Welch, J. Johnson, R.I. Perry, X. Ma and R. Sharma (Eds.) Adaptive management of fisheries in response to climate change. FAO Fish. Aquac. Techn. Pap. 667. <https://doi.org/10.4060/cb3095en>.
- Peña Tercero, C.L. 2019. Eventos El Niño y su impacto en la pesquería de anchoveta en Perú. Tesis Master Cienc. Gestión Pesq. Sost., Univ. Alicante, España. 53p.
- Perea, Á., C. Peña, R. Oliveros-Ramos, B. Buitrón y J. Mori. 2011. Producción potencial de huevos, reclutamiento y veda reproductiva de la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*): Implicaciones en el manejo pesquero. Cienc. Mar., 37: 585-601. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-38802011000500006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802011000500006&lng=es&tlng=es).

Produce. 2012. Reglamento de organización y funciones, Imarpe, Res. Minist. N° 345-2012-Produce 23 de julio de 2012. 32 p. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1488605/ROF-Imarpe.pdf?v=1608565328>

Santander, H. y O. Sandoval de Castillo O. 1969. El desove de la anchoveta (*Engraulis ringens* J.) en los períodos reproductivos de 1961 a 1968. Inf. Imarpe, 40. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/1587>.

**RECIBIDO / RECEIVED:** 13/04/2023

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 28/01/2024



# Evaluación en la formación de discos de fijación secundaria de *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) en condiciones de cultivo semi-controladas

## Evaluating the formation of secondary attachment discs of *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) under semi-controlled cultivation conditions

Diocelina Huaman-Fernández<sup>1,2</sup>, Paul M. Baltazar-Guerrero<sup>1,2\*</sup>, Samuel J. Arbaiza-Quispe<sup>2</sup> y Orlando Advíncula Zeballos<sup>2</sup>

0000-0002-1865-4841

0000-0003-4071-4772

0000-0001-6258-429X

0000-0003-2042-7872

1. Carrera de Biología Marina, Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima 15067, Perú. 180000539@cientifica.edu.pe
2. Grupo de Investigación en Acuicultura Sostenible, Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Licma), Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación, Universidad Científica del Sur, Lima 15067, Perú. pbaltazar@cientifica.edu.pe\*; arbaiza.samuel@gmail.com; orlandoad@gmail.com

\* Autor de correspondencia / Corresponding autor

### RESUMEN

**C***hondracanthus chamissoi* es un alga de importancia comercial usada como materia prima en el consumo humano directo y en la extracción de carragenina. Esta especie es cultivada vía propagación vegetativa y/o mediante la producción de esporas; sin embargo, hay una falta de información sobre las técnicas para el manejo en etapas iniciales en la formación de discos de fijación secundaria (DFS) en laboratorio. El presente trabajo tuvo como objetivo determinar la formación de DFS en función de distintos tratamientos de cultivo inicial, empleando como sustrato natural valvas de *Argopecten purpuratus* para la fijación de los DFS, variando factorialmente el inóculo (alga lavada y sin lavar), el manejo del sustrato (biologizado y sin biologizar) y el agua (tratada y sin tratar). Los resultados mostraron una mayor formación de DFS de *C. chamissoi* en los tratamientos donde el alga era lavada y se contabilizaron un rango de 1 a 21 DFS / valva en promedio. Por otro lado, se observó un aumento significativo de DFS en la interacción de los tratamientos donde el agua era clorada y sin clorar o con sustrato biologizado y sin biologizar. Por lo tanto, se considera que realizar protocolos de limpieza en etapas iniciales es primordial para este tipo de cultivo por propagación vegetativa.

**PALABRAS CLAVES:** *Chondracanthus chamissoi*, propagación vegetativa, discos de fijación secundaria.

### ABSTRACT

**C***hondracanthus chamissoi* is a commercially important algae used as raw material in direct human consumption and carrageenan extraction. This species is cultivated via vegetative propagation and through the production of spores; however, there is a lack of information on techniques for early-stage secondary attachment discs (SAD) formation under laboratory conditions. The present work aimed to determine the formation of DFS in function of different initial cultivation conditions, using *Argopecten purpuratus* shells as natural substrate for the SAD fixation, factorially varying the inoculum (washed algae and unwashed), the type of substrate (biologized; unbiologized) and the water (treated, untreated). Our results showed significant SAD formation of *C. chamissoi* in the treatments where the algae were washed and average of 1 - 21 SAD / shell was accounted. On the other hand, a significant increase in SAD is observed in the interaction of the treatments where the water was treated and untreated water or biologized and unbiologized. Therefore, we consider that cleaning protocols in the initial stages is essential for this type of cultivation by vegetative propagation.

**KEYWORDS:** *Chondracanthus chamissoi*, vegetative propagation, Secondary Attachment Discs.

## INTRODUCCIÓN

*Chondracanthus chamissoi*, o “yuyo”, es un alga roja que pertenece al Phylum Rhodophyta, grupo taxonómico con el mayor número de especies registradas en el Perú, y que cuenta con 185 de las 260 especies registradas últimamente (Ávila-Peltroche y Padilla-Vallejos, 2020). Esta macroalga se distribuye, desde Piura-Paita, Perú (5° S) hasta Ancud, Chile (42° S) (Ramírez y Santelices, 1991; Calderón *et al.*, 2010; Macchiavello *et al.*, 2017), crecen adheridas al sustrato duro (Otaíza y Cáceres, 2015), en la zona del intermareal inferior y submareal hasta 15 m de profundidad (Bulboa y Macchiavello, 2006). En el Perú, es considerada una de las algas rojas más abundantes del litoral, y posee una alta demanda en los mercados locales principalmente en consumo humano directo y en menor escala para la extracción de carragenanos; estas pueden ser comercializadas en estado fresco (4 %) y curado (96 %) (Pariona y Gil-Kodaka, 2011; Castañeda *et al.*, 2018; Espi *et al.*, 2019; Ávila-Peltroche y Padilla-Vallejos, 2020; Basaure *et al.*, 2021; Produce, 2021). Cabe indicar que los volúmenes de desembarque de macroalgas se han incrementado a lo largo de los años con un aumento importante entre 2010 (4368 ton) a 2021 (50480 ton) respectivamente, lo que representa un crecimiento importante aumentando en 12 veces los volúmenes de desembarques en los últimos 11 años (Produce, 2019, 2021).

Debido a su importancia comercial, *C. chamissoi* ha sido estudiada desde hace más de 20 años, con el objetivo de viabilizar su cultivo en el mar, destacando los avances realizados mediante su cultivo por propagación vegetativa (Macchiavello *et al.*, 2003, 2017; Bulboa y Macchiavello, 2006; Pariona y Gil-Kodaka, 2011; Arbaiza, 2016; Colque, 2017; Zapata-Rojas *et al.*, 2020; Basaure *et al.*, 2021; Oyarzo *et al.*, 2021). Esta técnica de cultivo consiste en la formación de nuevos brotes a partir de un inóculo inicial o planta madre, que se obtiene al fijar el alga sobre un sustrato natural y/o artificial, que posteriormente será puestos en sistemas de cultivo marino, ya sea en fondo o suspendido (Sáez *et al.*, 2008; Arbaiza, 2016; Basaure *et al.*, 2021). El cultivo por propagación vegetativa tiene la ventaja de poder realizarse durante todo año, por no depender de individuos con estructuras reproductivas, convirtiéndose en una metodología sencilla y de menor inversión respecto al cultivo vía esporas (Macchiavello *et al.*, 2012). Otra de sus mayores fortalezas es la producción de biomasa en un tiempo corto y utilizando técnicas o tecnologías de baja complejidad (Bulboa *et al.*, 2013; Saez y Macchiavello, 2018; Basaure *et al.*, 2021).

## INTRODUCTION

*Chondracanthus chamissoi*, or “yuyo”, is a red alga belonging to the phylum Rhodophyta, the taxonomic group with the largest number of species recorded in Peru (185 out of the 260 species in recent reports) (Ávila-Peltroche and Padilla-Vallejos, 2020). This seaweed is distributed from Piura, Paita, Peru (5° S), to Ancud, Chile (42° S) (Ramírez and Santelices, 1991; Calderón *et al.*, 2010; Macchiavello *et al.*, 2017). It grows while attached to hard substrate (Otaíza and Cáceres, 2015) in the inferior intertidal and subtidal zones down to 15 m deep (Bulboa and Macchiavello, 2006). In Peru, it is considered to be one of the most abundant red seaweeds in the littoral, and it is in high demand in local markets, mainly for direct human consumption and, to a lesser extent, for the extraction of carrageenans; these seaweeds can be commercialized in both fresh (4 %) and cured (96 %) states (Pariona and Gil-Kodaka, 2011; Castañeda *et al.*, 2018; Espi *et al.*, 2019; Ávila-Peltroche and Padilla-Vallejos, 2020; Basaure *et al.*, 2021; Produce, 2021). It is worth indicating that the volumes of seaweeds landings have increased over the years, *i.e.*, between 2010 (4368 ton) and 2021 (50480), which amounts to 12 times the landing volumes of the last 11 years (Produce, 2019, 2021).

Given its commercial importance, *C. chamissoi* has been studied for more than 20 years with the purpose of making its cultivation at sea feasible, wherein the advances made in vegetative propagation stand out (Macchiavello *et al.*, 2003, 2017; Bulboa and Macchiavello, 2006; Pariona and Gil-Kodaka, 2011; Arbaiza, 2016; Colque, 2017; Zapata-Rojas *et al.*, 2020; Basaure *et al.*, 2021; Oyarzo *et al.*, 2021). This cultivation technique involves the formation of new shoots from an initial inoculum or mother plant, which is achieved by fixating the seaweed to a natural and/or artificial substrate. This substrate is subsequently placed in either bottom or suspended marine cultivation systems (Sáez *et al.*, 2008; Arbaiza, 2016; Basaure *et al.*, 2021). One of the advantages of cultivation by vegetative propagation is that it can be performed throughout the year, as it does not depend on individuals with reproductive structures. This makes it a simple methodology that requires lower investments in comparison with spore-based cultivation (Macchiavello *et al.*, 2012). One of its main strengths is also the production of biomass in short periods of time, in addition to the fact that it utilizes low-complexity techniques and technologies (Bulboa *et al.*, 2013; Saez and Macchiavello, 2018; Basaure *et al.*, 2021).



Entre algunas de las desventajas y/o dificultades que presenta este tipo de cultivo, es que se necesita abundante biomasa proveniente de praderas naturales (Bulboa *et al.*, 2013), considerando las pérdidas de biomasa por la presencia de epífitos y/o de sedimentos en las muestras colectadas (Arbaiza *et al.*, 2016). Esta pérdida puede significar la disminución del inóculo inicial, conllevando a una mayor extracción de biomasa originaria de praderas naturales (Oyarzo *et al.*, 2021), lo que, en combinación con la extracción pesquera del recurso, provoca una reducción de la disponibilidad o productividad de las praderas en el tiempo (Flores *et al.*, 2015).

Bajo este contexto, diversos autores han señalado que para optimizar la formación de los DFS en un cultivo por propagación vegetativa, se debe tener en cuenta el tratamiento previo del inóculo inicial (limpieza con agua dulce y eliminación de epífitos o sedimento), el tratamiento del agua (filtrada, clorada y esterilizada) y el del sustrato (formación o limpieza del biofilm) (Icochea, 2008; Arbaiza, 2016; Colque, 2017; Macchiavello *et al.*, 2017; Arbaiza *et al.*, 2019; Suárez, 2019; Zapata-Rojas *et al.*, 2020; Oyarzo *et al.*, 2021). Para fines productivos, no se tiene claro cuál es el efecto de realizar estos procesos y además los protocolos relacionados a la limpieza y tratamiento del agua con cloro son escasos; por ello, el presente estudio tiene como finalidad evaluar la formación de DFS en función al manejo del sustrato, al tratamiento del inóculo y al tratamiento del agua de mar, en condiciones de cultivo para contribuir en la optimización de las fases iniciales del cultivo, mediante la propagación vegetativa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Las muestras de *C. chamissoi* fueron recolectadas de la playa Mendieta, ubicada en la Reserva Nacional de Paracas en el distrito de Paracas, provincia de Pisco, departamento de Ica en Perú, el 18 de julio de 2020 a través de buceo autónomo (14°3'38.54" S; 76° 15' 54.72" O) (Figura 1). Realizada la colecta de algas, éstas fueron transportadas en contenedores térmicos aislados a 10 °C al Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Licma) de la Universidad Científica del Sur, ubicado en el distrito de San Andrés, provincia de Pisco, departamento de Ica en Perú. Una vez en el laboratorio, se seleccionaron las algas en estado vegetativo (individuos sin estructuras reproductivas visibles), como sugieren Macchiavello *et al.* (2012).

Among the disadvantages and/or difficulties of this form of cultivation is the fact that it requires abundant biomass from natural beds (Bulboa *et al.*, 2013), considering the biomass losses caused by the presence of epiphytes and/or sediment in the samples collected (Arbaiza *et al.*, 2016). These losses may entail the reduction of the initial inoculum, leading to a greater extraction of biomass from natural beds (Oyarzo *et al.*, 2021). This, in combination with the fishing extraction of the resource, reduces the availability and productivity of beds over time (Flores *et al.*, 2015).

In this context, several authors have pointed out that, in order to optimize the formation of secondary attachment discs (SADs) in a vegetative propagation culture, one must consider the previous treatment of the initial inoculum (cleaning with freshwater and elimination of epiphytes or sediment), as well as that of the water (filtration, coloration, and sterilization) and the substrate (formation or cleaning of the biofilm) (Icochea, 2008; Arbaiza, 2016; Colque, 2017; Macchiavello *et al.*, 2017; Arbaiza *et al.*, 2019; Suárez, 2019; Zapata-Rojas *et al.*, 2020; Oyarzo *et al.*, 2021). For productive purposes, the effect of these processes is unclear, and protocols related to water cleaning and treatment with chlorine are scarce. Therefore, this work aims to evaluate the formation of SADs as a function of substrate handling and inoculum and seawater treatment, with the purpose of contributing to the optimization of the initial stages of cultivation via vegetative propagation.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

*C. chamissoi* samples were collected at Mendieta beach, located in the Paracas National Reserve (Paracas district, Pisco province, department of Ica, Peru), on July 18<sup>th</sup>, 2020, by means of autonomous diving (14°3'38.54" S; 76° 15' 54.72" O) (Figure 1). After collection, the seaweeds were transported in isolated thermal containers at 10 °C to Universidad Científica del Sur's Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Licma), located in the district of San Andrés, Pisco province, department of Ica, Peru. Upon arriving at the laboratory, the algae in vegetative state were selected (individuals with no visible reproductive structures), as suggested by Macchiavello *et al.* (2012).

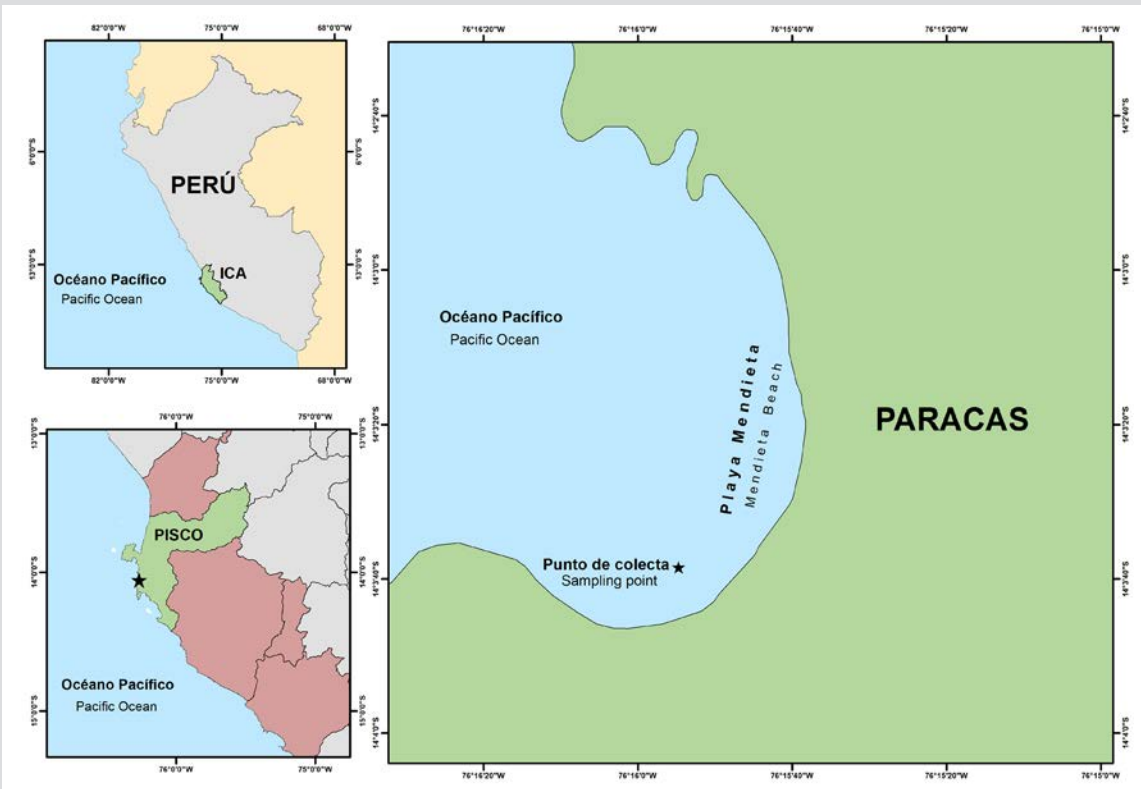


Figura 1. Mapa de ubicación del punto de colecta de *C. chamissoi* en playa Mendieta, Ica – Perú (14°3'38.54" S; 76 ° 15' 54.72" O).

Figure 1. Location of the *C. chamissoi* sampling point at Mendieta beach, Ica, Peru (14°3'38.54" S; 76 ° 15' 54.72" O)

**Diseño experimental**

Se trabajó con ocho tratamientos (cuatro repeticiones por cada tratamiento) donde se evaluó: el tratamiento del sustrato (biologizado y sin biologizar), el tratamiento previo del alga (con lavado y sin lavar) y el del medio de cultivo (agua tratada y sin tratar) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Diseño experimental con datos factoriales. Tratamiento del inóculo, alga lavada (L) o sin lavada (S); sustrato biologizado (B) o sin biologizar (S) y agua tratada (CI) o sin tratar (S).

**Experimental design**

Eight treatments (with four repetitions each) were employed, evaluating the substrate treatment (biologized and non-biologized), the previous algae treatment (washed and unwashed), and the culture medium (treated and untreated water) (Table 1).

**Table 1.** Experimental design with factorial data. Inoculum treatment; washed (L) or unwashed (S) algae; biologized (B) or non-biologized (S) substrate; and treated (CI) or untreated (S) water.

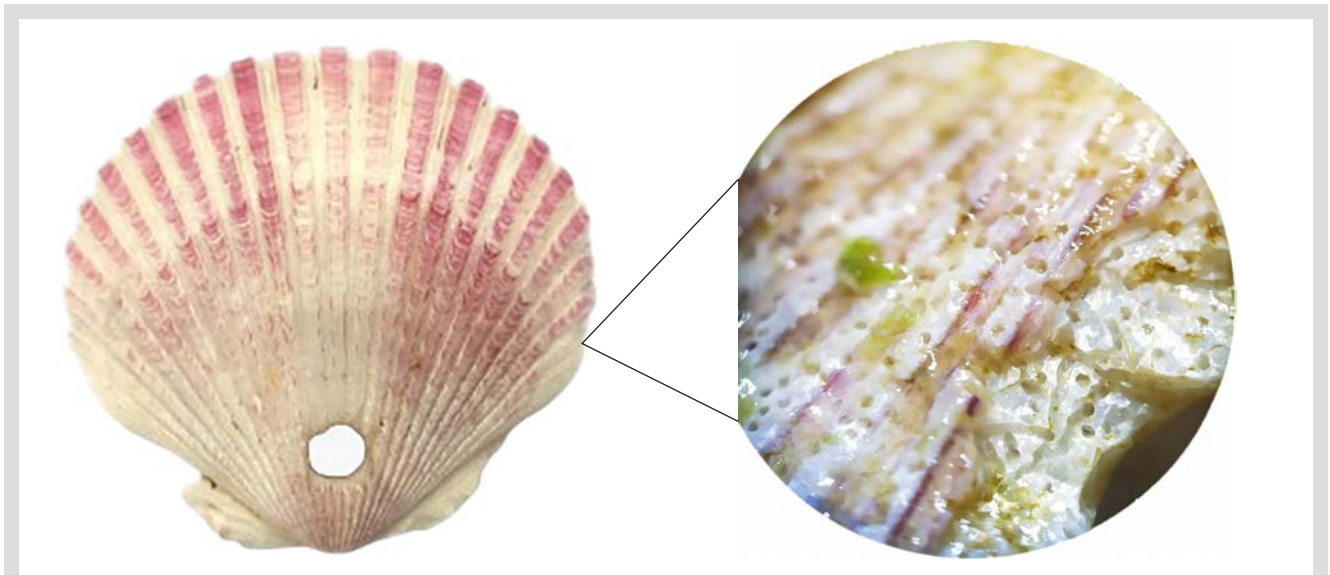
Tratamiento / Treatment	Alga / Algae	Sustrato / Substrate	Agua / Water	Réplicas / Repetitions
T1	Lavado (L) / Washed (L)	Biologizado (B) / Biologized (B)	Agua tratada (CI) / Treated water (CI)	4
T2	Lavado (L) / Washed (L)	Biologizado (B) / Biologized (B)	Agua sin tratar (S) / Untreated water (S)	4
T3	Lavado (L) / Washed (L)	Sin Biologizar (S) / Non-biologized (S)	Agua tratada (CI) / Treated water (CI)	4
T4	Lavado (L) / Washed (L)	Sin Biologizar (S) / Non-biologized (S)	Agua sin tratar (S) / Untreated water (S)	4
T5	Sin Lavar (S) / Unwashed (S)	Biologizado (B) / Biologized (B)	Agua tratada (CI) / Treated water (CI)	4
T6	Sin Lavar (S) / Unwashed (S)	Biologizado (B) / Biologized (B)	Agua sin tratar (S) / Untreated water (S)	4
T7	Sin Lavar (S) / Unwashed (S)	Sin Biologizar (S) / Non-biologized (S)	Agua tratada (CI) / Treated water (CI)	4
T8	Sin Lavar (S) / Unwashed (S)	Sin Biologizar (S) / Non-biologized (S)	Agua sin tratar (S) / Untreated water (S)	4

### Tratamiento del sustrato

Se utilizaron valvas de *Argopecten purpuratus* (sustrato natural), las cuales fueron esterilizadas con hipoclorito de sodio al 1 % durante 10 min (Arbaiza, 2016) y posteriormente procesadas de dos formas diferentes: a) Sustrato biologizado, 16 valvas se sumergieron verticalmente en tinas de incubación de 3.2 m<sup>3</sup> con agua de mar por 15 días para propiciar la formación de biopelículas (biofilm) (Figura 2). El agua de las tinas fue mantenida a una temperatura de 20 - 21 °C, salinidad 35 - 36 ups, fotoperiodo 8:12 (luz:oscuridad) y abundante aireación. b) Sustrato sin biologizar, las 16 valvas fueron guardadas directamente luego del proceso de desinfección en bolsas herméticas (ziploc) para su posterior uso.

### Substrate treatment

Shells of *Argopecten purpuratus* (natural substrate) were used, which were sterilized with 1 % sodium hypochlorite for 10 min (Arbaiza, 2016) and subsequently processed in two different ways: a) biologized substrate: 16 shells were vertically submerged in 3.2 m<sup>3</sup> incubation tanks with seawater for 15 days in order to promote the formation of biofilms (Figure 2). The water in the tanks was maintained at a temperature of 20 - 21 °C, a salinity of 35 - 36 ups, a photoperiod of 8:12 (light:darkness), and abundant aeration; b) non-biologized substrate: the 16 shells were stored in hermetic bags (Ziplock) directly after the disinfection process for later use.



**Figura 2.** Tratamiento del sustrato, sin biologizado y biologizado con formación de biofilms.

**Figure 2.** Substrate treatment, non-biologized and biologized with biofilm formation.

### Tratamiento del agua

El agua de mar fue recolectada de la playa San Andrés y acondicionada en el Licma a una temperatura de 16 - 17 °C, salinidad 35 - 36, fotoperiodo 8:16 (luz: oscuridad) e intensidad lumínica 2300 lux. Posteriormente el agua fue tratada de dos formas diferentes: a) Agua tratada, mediante la adición de hipoclorito de sodio a una concentración de 2 % por 1000 mL de agua de mar, posteriormente se dechloró con tiosulfato de sodio a una concentración de 1 mL por 4 mL de Cl (Murray *et al.*, 2018), proveniente de una solución madre de tiosulfato al 25 %. b) Agua sin tratar, no se realizó ningún procedimiento.

### Water treatment

Seawater was collected from San Andrés beach and conditioned at Licma at a temperature of 16 - 17 °C, a salinity 35 - 36 ups, a photoperiod of 8:16 (light:darkness), and a light intensity of 2300 lux. Afterwards, the water was treated in two different ways. a) The water was treated by adding sodium hypochlorite at a concentration of 2 % for every 1000 mL of seawater. It was then dechlorinated with sodium thiosulfate, using 1 mL for every 4 mL of Cl (Murray *et al.*, 2018), from a mother solution of 25 % thiosulfate. b) The water was left untreated, and no procedures were carried out.

## Tratamiento del alga

En laboratorio las muestras de algas pasaron por un proceso de limpieza mecánica para eliminar los epífitos o residuos de sedimentos adheridos a las estructuras de los individuos y luego fueron procesadas de dos formas diferentes: a) alga lavada, se lavaron brevemente los especímenes con una solución de hipoclorito de sodio al 1 % por 30 seg y luego con agua dulce por 1 min para eliminar el residuo químico. b) Alga sin lavar, no se realizó ningún procedimiento.

## Fijación del alga al sustrato e incubación.

Los individuos en estado vegetativo fueron pesados en una balanza analítica agregando 7 g de *C. chamissoi* (peso húmedo) para cada unidad experimental, considerando las características morfológicas descritas por Arbaiza *et al.* (2023). Seguidamente se fijaron sobre el sustrato (valva de *A. purpuratus*) utilizando una liga para propiciar el contacto del alga con la superficie garantizando una generación adecuada de DFS. Posteriormente, los sustratos con las algas fijadas fueron instalados en los sistemas de cultivo por 38 días (frascos de 1L con 800 mL de agua de mar) y mantenidos en condiciones de 17 - 19 °C de temperatura, fotoperiodo de 12:12 (luz:oscuridad, 2300 lux), aireación constante, dos recambios de agua semanales y adicionalmente se les agregó un nutriente foliar comercial (Bayfolan ®) a una razón de 0.2 mL por 1 L de agua de mar (Castañeda *et al.*, 2018). Una vez terminada la etapa experimental, se retiraron los inóculos sobre las valvas con ayuda de un bisturí, seguidamente se procedió a pesar (peso húmedo) los individuos vegetativos. Finalmente se determinó el número total de DFS por valva, mediante conteo directo utilizando un estereoscopio modelo Leica EZ4E; cabe señalar que solo se contabilizaron los DFS que se fijaron en las valvas, y las fotos a mayor aumento permitieron corroborar que durante el conteo no se perdiera algún DFS y, además, permitió observar a detalle la formación de estas estructuras sobre las valvas (Figura 3).

## Análisis estadístico

Se realizaron pruebas de hipótesis utilizando un modelo de regresión binomial negativa por tratarse de una variable de conteo, para analizar los datos de la formación de discos de fijación secundaria y se encontró con la prueba de Shapiro-Wilk que los datos presentan una distribución normal ( $p > 0.05$ ) y también una homogeneidad de varianzas. El análisis de la información y los gráficos fueron realizados en los programas de R4.2.0 (Copyright © 2022) y Excel 2016 (© Microsoft bajo licencia).

## Algae treatment

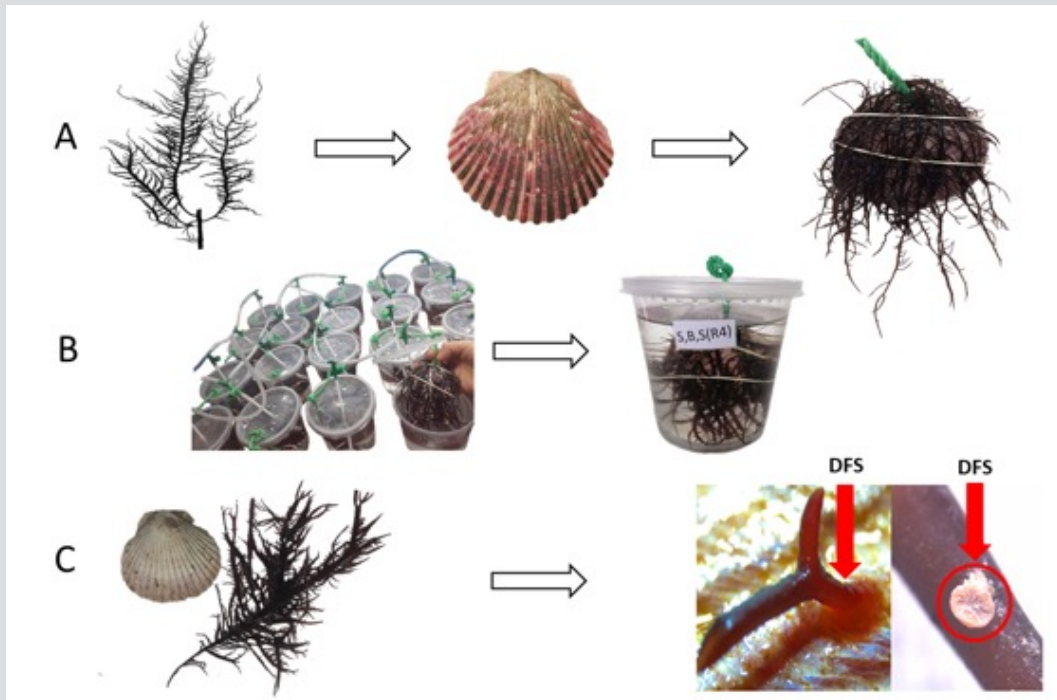
In the laboratory, the algae samples underwent a mechanical cleaning process aimed at eliminating epiphytes or sediment residues adhered to the individuals' structures, and they were then processed in two different ways: a) unwashed algae: the specimens were briefly washed with a 1 % sodium hypochlorite solution for 30 s, and then with freshwater for 1 min to eliminate chemical residues; b) unwashed algae: no procedure was carried out.

## Fixating the algae to the substrate and incubation

The individuals in vegetative state were weighted in an analytical balance, adding 7 g of *C. chamissoi* (wet weight) to each experimental unit, considering the morphological characteristics described by Arbaiza *et al.* (2023). Next, they were attached the substrate (*A. purpuratus* shell) using a rubber band to promote contact between the seaweed and the surface, ensuring proper DFS generation. Then, the substrates with the fixated algae were placed in cultivation systems for 38 days (1 L flasks with 800 mL of seawater) and maintained under the following conditions: a temperature of 17 - 19 °C, a photoperiod of 12:12 (light:darkness, 2300 lux), constant aeration, and two water replacements on a weekly basis. In addition, a commercial foliar nutrient (Bayfolan ®) was added, at a ratio of 0.2 mL for every 1 L of seawater (Castañeda *et al.*, 2018). Once the experimentation phase was complete, the inocula were removed from the shells using a scalpel, and the vegetative individuals were then weighted (wet weight). Finally, the total number of SADs per shell was determined by direct counting, employing a Leica EZ4E stereoscope. It is worth noting that only the SADs that were attached to the shells were counted, and higher magnification photos allowed confirming that no SAD was lost during the count while also allowing to observe the formation of these structures on the shells in detail (Figure 3).

## Statistical analysis

Hypothesis tests were performed using a negative binomial regression model, as we were dealing with a count variable, in order to analyze the formation of secondary attachment discs. By means of a Shapiro-Wilk test, the data were found to exhibit a normal distribution ( $p > 0.05$ ) and variance homogeneity. The analysis of the information and the elaboration of graphs were carried out in the R4.2.0 software (copyright © 2022) and Excel 2016 (Microsoft, under license).



**Figura 3.** Proceso experimental de cultivo de *C. chamissoi* por propagación vegetativa. **A.** Fijación del inóculo sobre la valva de *A. purpuratus*. **B.** Sistema de incubación y desarrollo de los discos de fijación secundaria (DFS). **C.** Retiro del inóculo y observación de los DFS.

**Figure 3.** Experimental process for the cultivation of *C. chamissoi* via vegetative propagation. **A.** Fixation of the inoculum onto an *A. purpuratus* shell. **B.** Incubation system and formation of secondary attachment discs (SADs). **C.** Removal of the inoculum and observation of the SADs.

## RESULTADOS

Se ha evidenciado con las pruebas estadísticas que los valores de DFS son significativamente diferentes en el tratamiento entre algas sin lavar y lavadas ( $p = 0.03921$ ), pero no así en los tratamientos del sustrato y del agua usada como medio de cultivo. Sin embargo, se puede apreciar una interacción entre el tratamiento del alga con el sustrato ( $p = 0.03079$ ) y el tratamiento del sustrato con el agua ( $p = 0.01559$ ). Por otro lado, se obtuvo un cociente de desviación sobre los grados de libertad (24) de 1.406, lo que indica un buen ajuste del modelo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Tabla multifactorial de los tratamientos y las interacciones entre ellos.

	Residuales de desviación / Residuals of deviation	Desviación de residuales / Deviation of residuals	Pr (> Chi)
Algas / Algae	4.2519	48.440	0.03921 *
Sustrato / Substrate	0.3010	48.139	0.58324
Agua / Water	0.2341	47.905	0.62846
Algas: Sustrato / Algae: Substrate	4.6647	43.240	0.03079 *
Agua: Algas / Water: Substrate	1.6561	41.584	0.19814
Sustrato: Agua / Substrate: Water	5.8480	35.736	0.01559 *
Agua-Sustrato-Alga / Water-Substrate-Algae	1.9795	33.756	0.15944

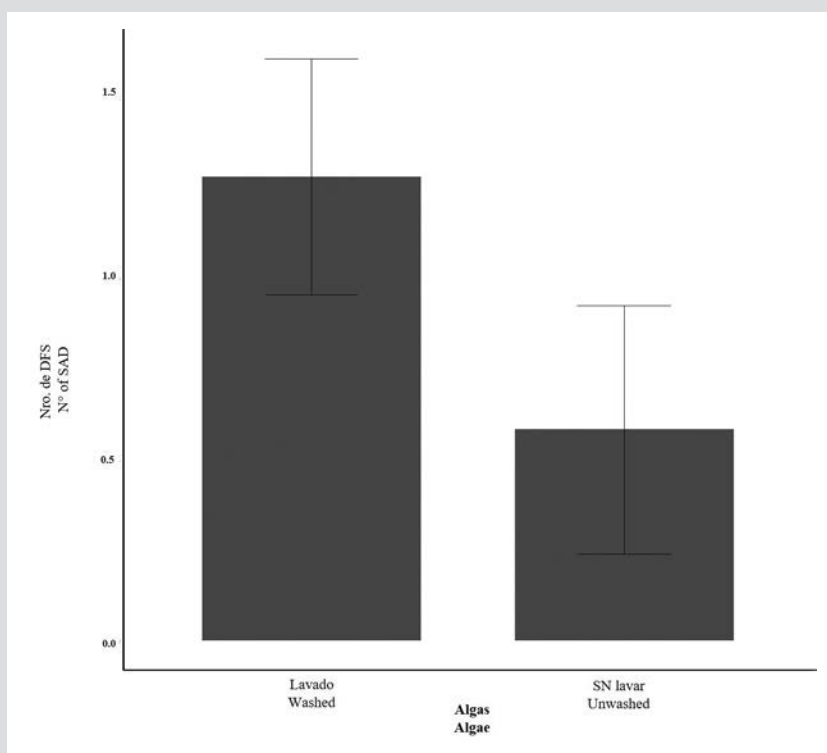
## RESULTS

Through the statistical tests, it was evidenced that the SAD values are significantly different for unwashed and washed algae ( $p = 0.03921$ ), which is not the case for the substrate treatments and the water used as culture medium. However, interaction between the algae treatment and the substrate can be observed ( $p = 0.03079$ ) and between the substrate treatment and the water ( $p = 0.01559$ ). On the other hand, a deviation quotient of 1.406 over the degrees of freedom (24) was obtained, indicating a good model fit (Table 2).

**Table 2.** Multifactorial table for the treatments and the interaction between them

En la figura 4 se puede observar, según el tratamiento de las algas, que las lavadas presentaron mayor formación de DFS en función a los tratamientos que presentaron algas sin lavar. Las medias de las algas sin lavado fueron de  $0.584 \pm 0.343$  y de las algas lavadas fueron de  $1.282 \pm 0.382$ .

Figure 4 shows that, depending on the treatment, the washed algae exhibited a greater formation of SADs in comparison with the treatments involving unwashed algae. The means of the unwashed algae were  $0.584 \pm 0.343$ , and that of the washed ones was  $1.282 \pm 0.382$ .



**Figura 4.** Cantidad de discos de fijación secundaria (DFS) en función del tratamiento del alga (lavada y sin lavar).

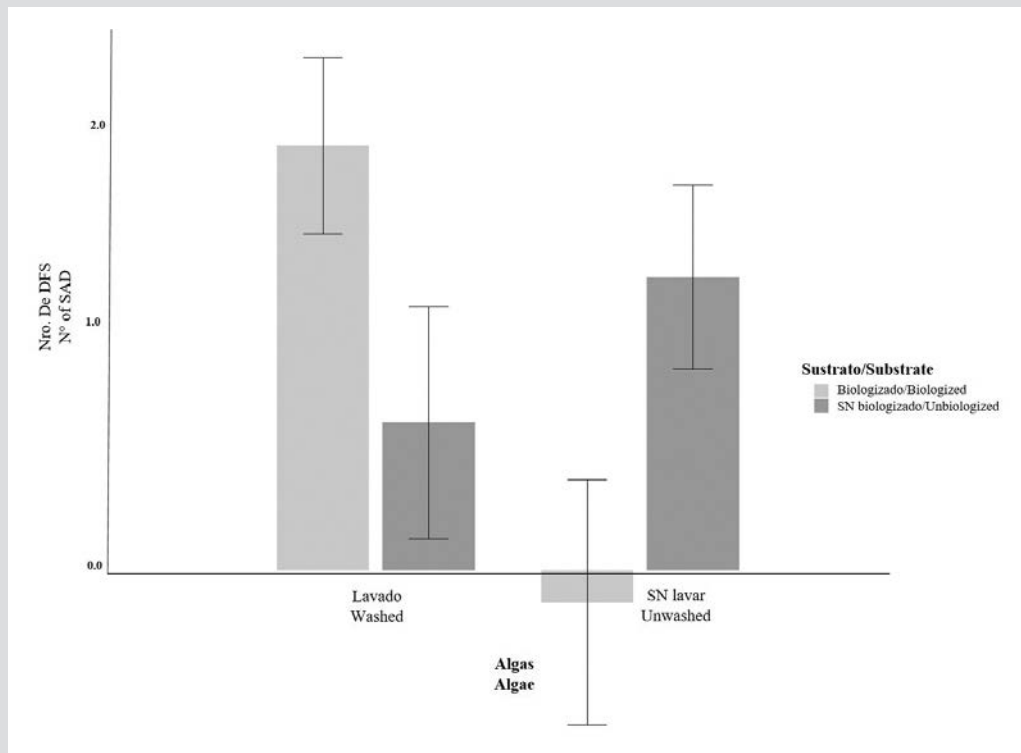
**Figure 4.** Number of secondary attachment discs SADs per algae treatment (washed and unwashed)

En la figura 5 se puede observar que hubo una interacción del tratamiento del alga con el sustrato, en la cual el tratamiento del alga lavada con sustrato biologizado presentó medias similares de  $1.903 \pm 0.395$  al tratamiento de las algas sin lavar y el sustrato sin biologizar ( $1.313 \pm 0.412$ ). Por otro lado, la interacción del alga lavada con sustrato sin biologizado presentó menores medias de  $0.661 \pm 0.519$ , similares al tratamiento del alga sin lavar y sustrato biologizado ( $-0.144 \pm 0.550$ ).

Figure 5 shows that there was interaction between the algae treatment and the substrate, wherein washed algae and biologized substrates exhibited similar means ( $1.903 \pm 0.395$ ) to those of unwashed algae and non-biologized substrates ( $1.313 \pm 0.412$ ). On the other hand, the interaction between washed algae and non-biologized substrates reported lower means ( $0.661 \pm 0.519$ ), similar to those of unwashed algae and biologized substrates ( $-0.144 \pm 0.550$ ).

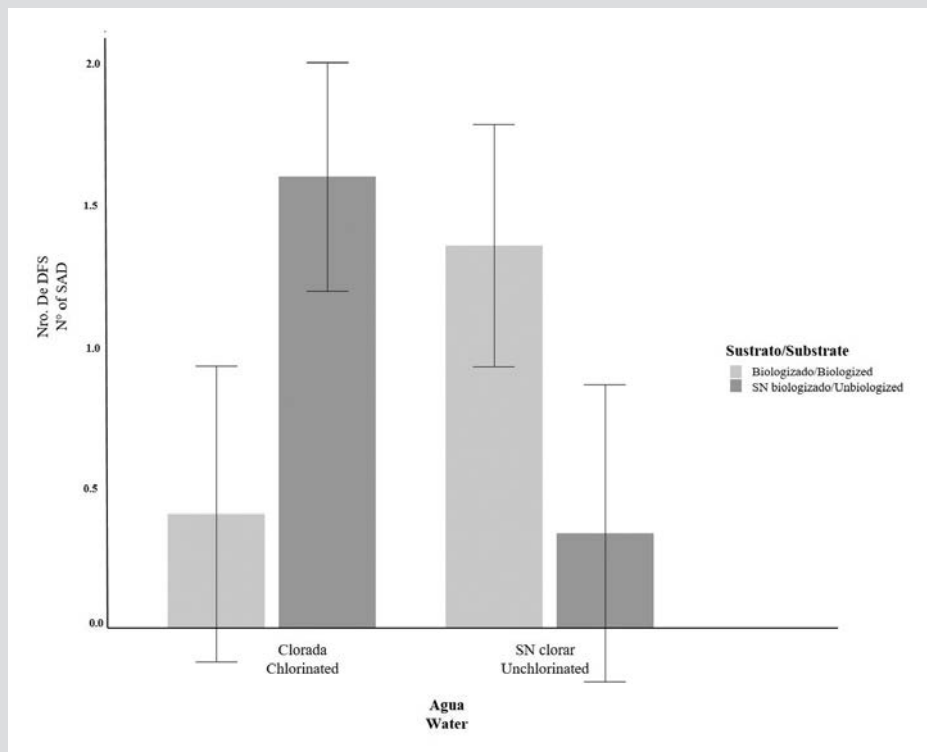
En la figura 6 se puede visualizar la interacción del tratamiento del agua con el sustrato, en el cual: el tratamiento del agua clorada y el sustrato sin biologizar presentaron medias similares ( $1.597 \pm 0.404$ ) al tratamiento del agua sin clorar con sustrato biologizado ( $1.354 \pm 0.404$ ). Por otro lado, también se puede apreciar que el agua clorada con el sustrato biologizado presentó medias similares ( $0.405 \pm 0.524$ ) que el agua sin clorar con el sustrato sin biologizar ( $0.377 \pm 0.525$ ).

Figure 6 shows the interaction between water treatment and substrate. Here, the chlorinated water treatment the non-biologized substrate exhibited similar means ( $1.597 \pm 0.404$ ) to those of unchlorinated water and the biologized substrate ( $1.354 \pm 0.404$ ). It can also be observed that the chlorinated water and the biologized substrate reported similar means ( $0.405 \pm 0.524$ ) to those of unchlorinated water and the non-biologized substrate ( $0.377 \pm 0.525$ ).



**Figura 5.** Cantidad de DFS en función a la interacción del tratamiento del alga (lavado y sin lavado) y del sustrato (biologizado y sin biologizar).

**Figure 5.** Number of SADs as a function of the interaction between the algae treatment (washed and unwashed) and the substrate (biologized and non-biologized)



**Figura 6.** Cantidad de DFS en función a la interacción del tratamiento del agua (clorada y sin clorar) y del sustrato (biologizado y sin biologizar).

**Figure 6.** Number of SADs as a function of the interaction between the water treatment (chlorinated and unchlorinated) and the substrate (biologized and non-biologized)

## DISCUSION

*Chondracanthus chamissoi* presenta diversas estrategias reproductivas, como la propagación por esporas y la readhesión por fragmentación del talo, que le permiten mantenerse en su ambiente natural durante todo el año (Acleto, 1986; Alveal, 2001; Vásquez y Vega, 2001; Riofrío, 2003; Fonck *et al.*, 2008). La formación de DFS no solo permite el anclaje de las frondas a la deriva de *C. chamissoi*, sino que también juega un papel importante en poder propagarse a nuevas áreas de cultivo ante la presencia de un medio en condiciones ambientales estresantes para el cultivo de algas rojas (Pacheco-Ruiz *et al.*, 2005; Sáez *et al.*, 2008). En este estudio todos los tratamientos formaron DFS (de 1 a 21 DFS / valva) a los 38 días de cultivo, datos similares a los obtenidos por otros investigadores, los cuales obtuvieron entre  $2 \pm 1$  y  $20 \pm 8$ , 1 a 27;  $32 \pm 15$  y  $27 \pm 7$  DFS / valva a partir de los 20 a 40 días de cultivo (Bulboa *et al.*, 2013; Arbaiza, 2016; Sáez y Macchiavello, 2018; Zapata-Rojas *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos indican que los procesos de limpieza del alga favorecen a que haya una mayor formación de DFS, reflejo de lo observado en la tabla 2 y la figura 4; esto se puede deber a que con la limpieza previa de las algas durante las etapas iniciales de cultivo se eliminaron sedimentos o algas epifitas adheridas a *C. chamissoi*, restringiendo así la competencia por el sustrato y nutrientes del medio (Vásquez y Vega, 2001). El presente resultado coincidió con los procedimientos previos (alga lavada) realizados por Arbaiza (2016) para *C. chamissoi*, determinándose que con la limpieza previa de las algas se puede obtener mayor cantidad DFS.

Por otro lado, en este estudio el tratamiento del agua por sí solo no presentó diferencias significativas; sin embargo, se pudo observar que si hubo interacción en los tratamientos del agua con el sustrato con ligeras diferencias. En investigaciones previas indican que algunas bacterias presentes en el medio están involucradas en la producción y degradación de fitohormonas y bioestimulantes del crecimiento y desarrollo celular del alga para la formación de DFS (Meusnier *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2011; Singh and Reddy, 2014; Alsufyani *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha podido apreciar que con el uso de agua de mar clorada y sin clorar hay formación de DFS (Bulboa *et al.*, 2013; Arbaiza, 2016, 2023). Por lo que, para favorecer la formación de DFS probablemente no sea necesario usar agua filtrada o clorada porque este proceso implica que se incremente el tiempo entre clorar o declorar conllevando a retrasos logísticos y que se

## DISCUSSION

*Chondracanthus chamissoi* exhibits diverse reproduction strategies, such as spore-based propagation and reattachment by fragmentation of the thallus, allowing it to remain in its natural environment throughout the year (Acleto, 1986; Alveal, 2001; Vásquez and Vega, 2001; Riofrío, 2003; Fonck *et al.*, 2008). Not only does SAD formation allow for the anchoring of drifting fronds of *C. chamissoi*, but it also plays an important role in the ability to propagate to new areas in the face of stressful environmental conditions for red algae cultivation (Pacheco-Ruiz *et al.*, 2005; Sáez *et al.*, 2008). In this study, all treatments formed SADs (1 - 21 SADs / shell) after 38 days of cultivation. These data are similar to those obtained by other researchers, who reported between  $2 \pm 1$  and  $20 \pm 8$ ; 1 and 27; and  $32 \pm 15$  and  $27 \pm 7$  SADs / shell over 20 - 40 days of cultivation (Bulboa *et al.*, 2013; Arbaiza, 2016; Sáez and Macchiavello, 2018; Zapata-Rojas *et al.*, 2020).

The results obtained indicate that algae cleaning process favor a greater SAD formation, as shown in Table 2 and Figure 4. This may be due to the fact that, with prior algae cleaning at the initial stages of cultivation, the sediments or epiphyte algae attached to *C. chamissoi* were eliminated, restricting competition for substrate and nutrients in the medium (Vásquez and Vega, 2001). These results agree with the previous procedures (washed algae) performed by Arbaiza (2016) for *C. chamissoi*. It can be stated that a greater amount of SADs can be obtained via prior algae cleaning.

On the other hand, in this study, the water treatment alone exhibited no significant differences. However, it could be observed that there was indeed interaction between water treatments and substrates, with slight differences. Previous research indicates that some bacteria present in the medium are involved in the production and degradation of algae phytohormones and biostimulants of cell growth and development for the formation of SADs (Meusnier *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2011; Singh and Reddy, 2014; Alsufyani *et al.*, 2020). Nevertheless, it has been observed that the use of chlorinated and unchlorinated seawater entails SAD formation (Bulboa *et al.*, 2013; Arbaiza, 2016, 2023). Therefore, in order to favor SAD formation, it may be unnecessary to use filtrated or chlorinated water, since this process implies extended times for chlorination or dechlorination, leading to logistic delays and the elimination of bacteria that could favor growth or SAD formation.



elimine la presencia de bacterias que podrían favorecer el crecimiento o formación de DFS.

Asimismo, el tratamiento del sustrato (biologizado y sin biologizar) presentó una interacción con el tratamiento del alga; sin embargo, no fue significativo en la formación de DFS a pesar de que estudios realizados previamente mencionan que lavar y desinfectar el sustrato con hipoclorito de sodio permite la eliminación de los microorganismos adheridos los cuales pueden afectar la formación de DFS (Macchiavello *et al.*, 2012; Zapata-Rojas *et al.*, 2020). No obstante, investigaciones contrastan lo señalado anteriormente dando a entender que la presencia de biofilm (bacterias y mucilago) pueden aumentar la energía superficial del sustrato, por ende, favorecen el asentamiento de las macroalgas (Lobban y Harrison, 1990; Hurd *et al.*, 2014). Sin embargo, en este estudio se pudo apreciar la formación de DFS con sustrato biologizado y sin biologizar.

La formación de DFS en la presente investigación se observó en casi todos los tratamientos con agua de mar clorada, sin clorar, sustrato biologizado, sin biologizar, alga lavada, alga sin lavar y también se apreció un aumento de biomasa en algunos tratamientos. Sin embargo, a pesar de tener el cultivo en condiciones controladas se pudo apreciar la presencia de epífitos y diatomeas, lo que pudo alterar la formación de DFS y ocasionar la despigmentación o necrosamiento de las algas. Estos microorganismos causan efectos en el cultivo, entre los que se pueden resaltar la competencia por la luz y por nutrientes del medio, densidad y/o peso sobre el alga hospedadora generando un desprendimiento del sustrato (Fletcher, 1995; Bulboa, 2006). En este estudio, la presencia de epífitos persistió en las algas a pesar de ser lavadas, esto probablemente se deba a que se desarrollaron en el agua de mar sin tratar o que durante la etapa experimental no se añadió  $\text{GeO}_2$  y penicilina potásica, que, según Arbaiza (2016), son aditivos que ayudan a controlar la presencia de diatomeas y cianobacterias presentes en el medio de cultivo, por lo que recomienda realizar una limpieza rigurosa y que el cultivo esté provisto de un sistema de flujo continuo. Este sistema con flujo de agua continuo permitirá la captación de nutrientes del medio marino, como lo sugieren Bulboa *et al.* (2013).

## CONCLUSIONES

Este estudio permite tener una idea de los procesos en etapas iniciales que requiere *C. chamissoi* para su cultivo por propagación vegetativa. En este caso, se muestra que el lavado previo de la macroalga puede favorecer una mayor

Likewise, the substrate treatment (biologized and non-biologized) exhibited interaction with algae treatments, but it was not significant in the formation of SADs, even though previous studies state that washing and disinfecting the substrate with sodium hypochlorite allows eliminating attached microorganisms that can affect the process (Macchiavello *et al.*, 2012; Zapata-Rojas *et al.*, 2020). Nevertheless, some studies refute the above, implying that the presence of biofilms (bacteria and mucilage) may increase the surface energy of the substrate, thus favoring the settling of seaweeds (Lobban and Harrison, 1990; Hurd *et al.*, 2014). This study, however, showed the formation of SADs with biologized and non-biologized substrates.

In this research, SAD formation was observed in almost all treatments with chlorinated and unchlorinated water, biologized and non-biologized substrates, and washed and unwashed algae. An increase in biomass was also observed in some treatments. However, despite the controlled conditions of the culture, the presence of epiphytes and diatoms could be observed, which may have altered the formation of SADs and caused the depigmentation or necrosis of the algae. These microorganisms have effects on the culture, notably through competition for light and nutrients in the medium and by increasing density and/or weight on the host algae, leading to detachment from the substrate (Fletcher, 1995; Bulboa, 2006). In this study, the presence of epiphytes persisted in the algae despite being washed, which is probably due to the fact that they developed in untreated seawater or that, during the experimentation phase, no  $\text{GeO}_2$  or penicillin was added. According to Arbaiza (2016), these additives help to control the presence of diatoms and cyanobacteria, which is why it is recommended that a rigorous cleaning is carried out and that the culture is provided with a continuous flow system. A continuous water flow system enables the capture of nutrients in the marine medium, as suggested by Balboa *et al.* (2013).

## CONCLUSIONS

This study provides an idea of the initial processes required by *C. chamissoi* for cultivation by vegetative propagation. In this case, it is shown that the prior washing of seaweeds may favor a greater production of SADs in short periods of time. However, in the interaction of variables, it could be observed that using chlorinated and unchlorinated water and biologized and non-biologized substrate also

producción de DFS en un corto periodo de tiempo. Sin embargo, se ha podido observar con la interacción de variables que, usar agua clorada, sin clorar, sustrato biologizado y sin biologizar también permite la formación de DFS. Se sugiere que, además de tener un ambiente controlado se debe analizar o añadir aditivos para evitar el crecimiento de diatomeas u otros microorganismos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto denominado: “Implementación de un cultivo comercial piloto de *Chondracanthus chamissoi* por propagación vegetativa en la Bahía de Paracas” el cual fue financiado por el PNIPA (Contrato N°136-2018-PNIPA-Subproyectos) y la Universidad Científica del Sur (UCSUR N° 061-2022-PRO99). Asimismo, a la Cooperativa de Pescadores Artesanales Algas Marinas (Cotrapalmar) por su apoyo en la colecta de las macroalgas.

allows for the formation of SADs. It is suggested that, in addition to having a controlled environment, additives could be used to prevent the growth of diatoms or other microorganisms.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the project titled “Implementación de un cultivo comercial piloto de *Chondracanthus chamissoi* por propagación vegetativa en la Bahía de Paracas”, which was funded by the PNIPA (Contract N°136-2018-PNIPA-Subproyectos) and Universidad Científica del Sur (UCSUR N° 061-2022-PRO99). In addition, we would like to thank Cooperativa de Pescadores Artesanales Algas Marinas (Cotrapalmar) for their support in seaweed collection.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Acleto, C. 1986. Algunos aspectos biológicos de *Gigatina chamissoi* (C. Ag.) J. Agardh (Rhodophyta, Gigartinales). Rev. Cienc. 74 (1): 38-47
- Alsufyani, T., G. Califano, M. Deicke, J. Grueneberg, A. Weiss, A. Engelen, M. Kwantes, J. Frieder, J. Ulrich and T. Wichard. 2020. Macroalgal–bacterial interactions: identification and role of thallusin in morphogenesis of the seaweed *Ulva* (Chlorophyta). J. Exp. Bot. 71 (11) :3340–3349. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa066>
- Alveal, K. 2001. Estrategias reproductivas de Rhodophyta y sus nexos con biodiversidad: 367-388. En Alveal, K y T Antezana (Eds). Sustentabilidad de la biodiversidad. Univ. Concepción, Chile.
- Arbaiza, S. 2016. Viabilidad reproductiva para el cultivo de *Chondracanthus chamissoi* proveniente de tres poblaciones del litoral peruano. Tesis M. Sc Aquac., Univ. Nacional Agraria La Molina, Perú. 114 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2772>
- Arbaiza, S., P. Gil-Kodaka., N. Arakaki y K. Alveal. 2019. Primeros estadios de cultivo a partir de carpóporas de *Chondracanthus chamissoi* de tres localidades de la costa peruana. Rev. Biol. Mar. Oceanogr., 54 (2): 198-207. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1901>
- Arbaiza, S., J. Ávila-Peltroche, M. Castañeda-Franco, A. Mires-Reyes, O. Advíncula and P. Baltazar. 2023. Vegetative propagation of the commercial red seaweed *Chondracanthus chamissoi* in Peru by secondary attachment disc during indoor cultivation. Plants, 12(10): 1940. <https://doi.org/10.3390/plants12101940>
- Ávila-Peltroche, J. and J. Padilla-Vallejos. 2020. The seaweed resources of Peru. Bot. Mar. 63(4): 381-394. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0026>
- Basaure, H., J. Macchiavello, C. Sepúlveda, F. Sáez, D. Yáñez, L. Vega and C Marín. 2021. Sea bottom culture of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta: Gigartinales) by vegetative propagation at Puerto Aldea, Tongoy Bay (northern Chile). Aquac. Res. 52: 2025-2035. <https://doi.org/10.1111/are.15051>
- Bulboa, C. 2006. Bases bio-tecnológicas para o cultivo de *Chondracanthus chamissoi*, uma alga vermelha de importância econômica da costa chilena. Tese Doutor. Univ. São Paulo. 131 p.
- Bulboa, C. and J. Macchiavello. 2006. Cultivation of cystocarpic, tetrasporic and vegetative fronds of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) on ropes at two localities in northern Chile. Invest. Mar., 34 (1): 109–112. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-71782006000100010>
- Bulboa, C., K. Véliz, F. Sáez, C. Sepúlveda, L. Vega and J. Macchiavello. 2013. A new method for cultivation of the carragenophyte and edible red seaweed *Chondracanthus chamissoi* based on secondary attachment disc: Development in outdoor tanks. Aquaculture. 410-411: 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.018>
- Calderón, M., M. Ramírez y D. Bustamante. 2010. Notas sobre tres especies de Gigartineae (Rhodophyta) del litoral peruano. Rev. Per. Biol., 17(1): 115- 121.
- Castañeda, M., S. Arbaiza, F. Diaz, Y. Castillo, P. Baltazar y O. Advíncula. 2018. Evaluación del fotoperiodo en el asentamiento de tetraesporas de *Chondracanthus chamissoi* sobre cuerdas de polipropileno en condiciones semi-controladas de laboratorio. An. Cient., 79 (2): 459 – 465. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.1256>



- Colque, L. 2017. Evaluación del crecimiento de cultivo vegetativo de *Chondracanthus chamissoi*, utilizando fertilizante comercial Bayfolan y medio Guillard f/2, en condiciones de laboratorio en el Centro de Acuicultura de Morro Sama del Fondepes. Tesis Ing. Pesq. Univ. Nal. Jorge Basadre Grohmann, Perú. 124 p.
- Espi, A., D. Robledo and L. Hayashi. 2019. Development of seaweed cultivation in Latin America: Current trends and prospects. *Phycologia*, 58(5): 462–471. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1640996>
- Fletcher, R. 1995. Epiphytism and fouling in *Gracilaria* cultivation: an overview. *J. Appl. Phycol.*, 7 (3): 325–333. <https://doi.org/10.1007/BF00004006>
- Flores, D., J. Zavala, S. Donayre, A. Guardia y H. Sarmiento. 2015. Evaluación poblacional de *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh, 1820) en las bahías de Pisco y Paracas, otoño 2010. *Inf. Inst. Mar. Perú*, 42(4): 504–509. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/2998>
- Fonck, E., R. Martínez, J. Vásquez and C. Bulboa. 2008. Factors that affect the re-attachment of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) thalli. *J. Appl. Phycol.*, 20 (3): 311–314. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9251-y>
- Hayakawa, Y., K. Kawata, K. Machida, S. Yamano, S. Akita and D Fujita. 2017. Phenology of *Chondracanthus tenellus* (Rhodophyta) in the central Pacific coast of Honshu, Japan. *J. Appl. Phycol.*, 29 (5): 2547–2556. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1110-x>
- Hurd, C.L., P. Harrison, K. Bischof and C. Lobban. 2014. Seaweed ecology and physiology. 2nd ed. Cambridge Univ. Press. <https://doi:10.1017/CBO9781139192637>
- Icochea, E. 2008. Bases biológicas para el manejo del recurso *Chondracanthus chamissoi* en el litoral marino de Huanchaco, Departamento La Libertad, Perú. Tesis Maest., Univ. Nal. Trujillo, Perú. 50 p.
- Lobban, R. and P. Harrison. 1994. Seaweed ecology and physiology. Cambridge.
- Macchiavello, J., C. Bulboa and M. Edding. 2003. Vegetative propagation and spore-based recruitment in the carrageenophyte *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta) in northern Chile. *Phycol. Res.*, 51(1): 45–50. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.00292.x>
- Macchiavello, J., C. Bulboa, C. Sepúlveda, K. Véliz, F. Sáez, L. Vega y R. Véliz. 2012. Manual de cultivo de *Chondracanthus chamissoi* (Chicorea de mar). Proyecto Huam Fondef. Univ. Católica Norte. Chile. 45 p.
- Macchiavello, J., C. Sepúlveda, H. Basaure, F. Sáez, D. Yáñez, C. Marín and L. Vega. 2017. Suspended culture of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta: Gigartinales) in Caleta Hornos (northern Chile) via vegetative propagation with secondary attachment discs. *J. Appl. Phycol.*, 30 (2): 1149–1155. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1307-z>
- Meusnier, I., J.L. Olsen, W.T. Stam, C. Destombe and M. Valero. 2001. Phylogenetic analyses of *Caulerpa taxifolia* (Chlorophyta) and of its associated bacterial microflora provide clues to the origin of the Mediterranean introduction. *Mol. Ecol.*, 10: 931–946. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2001.01245.x>
- Murray, A., E. Kumpel, R. Peletz, R. Khush and D. Lantagne. 2018. The effect of sodium thiosulfate dechlorination on fecal indicator bacteria enumeration: laboratory and field data. *J. Water Health*, 16(1): 70–77. <https://doi.org/10.2166/wh.2017.077>
- Otaíza, R. y J. Cáceres. 2015. Manual de una técnica para el repoblamiento de chicoria de mar, *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützinger (Rhodophyta, Gigartinales), en praderas naturales, Región del Biobío. Proyecto Fondef-Huam AQ1210004. Chile. 40 p.
- Oyarzo, S., M. Ávila, P. Alvear, J. Remonsellez., L. Contreras-Porcía and C. Bulboa. 2021. Secondary attachment disc of edible seaweed *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales): Establishment of permanent thalli stock. *Aquaculture*, 530: 735954. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735954>
- Pacheco-Ruiz, I., J. Zertuche-González and J. Espinoza-Ávalos. 2005. The role of secondary attachment discs in the survival of *Chondracanthus squarrosus* (Gigartinales, Rhodophyta). *Phycologia*, 44 (6): 629–631. [https://doi.org/10.2216/0031-8884\(2005\)44\[629:TROSAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2216/0031-8884(2005)44[629:TROSAD]2.0.CO;2)
- Pariona, E. y P. Gil-Kodaka. 2011. Colonización de *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) sobre sustratos calcáreos en Playa Mendieta, Reserva Nacional de Paracas. *An. Cient.*, 72 (1): 19–26. <https://doi.org/10.21704/ac.v72i1.854>
- Produce. 2019. Anuario estadístico pesquero y acuícola. Perú. 200 p. <https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/shortcode/oe-documentos-publicaciones/publicaciones-anuales/item/949-anuario-estadistico-pesquero-y-acuicola-2019> 26/01/23
- Produce. 2021. Anuario estadístico pesquero y acuícola. Perú. 189 p. <https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/shortcode/oe-documentos-publicaciones/publicaciones-anuales/item/1080-anuario-estadistico-pesquero-y-acuicola-2021> 26/01/23
- Ramírez, M.E. y B. Santelices. 1991. Catálogo de las algas marinas bentónicas de la costa temperada del Pacífico Sudamericano. *Monogr. Biol. Pont. Univ. Cat. Chile*. 437 p.
- Riofrío, O. 2003. Efecto de la variabilidad térmica sobre la biología vegetativa y reproductiva de *Chondracanthus chamissoi* (Agardh) Kützinger (Rhodophyta) en la bahía de Ancón, Perú. Tesis Biol. Univ. Nacional Mayor de San Marcos, Perú. 41 p.
- Sáez, F and J. Macchiavello. 2018. Secondary attachment discs: a new alternative for restoring populations of *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta). *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 46 (1): 140–146. <http://dx.doi.org/10.3856/vol46-issue1-fulltext-14>
- Sáez, F., J. Macchiavello, E. Fonck and C. Bulboa. 2008. The role of the secondary attachment disc in the vegetative propagation of *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales; Rhodophyta). *Aquat. Bot.*, 89 (1): 63–65. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.01.004>

- Singh, R.P. and C.R.K. Reddy. 2014. Seaweed–microbial interactions: key functions of seaweed-associated bacteria. FEMS Microbiol. Ecol., 88: 213-230. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12297>
- Singh, A., P.S. Nigam and J.D. Murphy. 2011. Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuels. Bioresour. Technol., 102 (1): 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.032>
- Suárez, S. 2019. Filogeografía del alga *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinaceae, Rhodophyta) en la costa peruana usando marcadores moleculares. Tesis Ing. Pesq., Univ. Nal. Agraria La Molina, Perú. 77 p.
- The R Foundation for Statistical Computing. Platform: x86\_64-w64-mingw32/x64 (64 bits).
- Vásquez, J. and J. Vega. 2001. *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) in northern Chile: ecological aspects for management of wild population. J. Appl. Phycol., 13 (3): 267-277. <https://doi.org/10.1023/A:1011152922832>
- Zapata-Rojas, J., A. Gonzales-Vargas y S. Zevallos-Feria. 2020. Estudio comparativo para propagación vegetativa de *Chondracanthus chamissoi*, Yuyo, sobre tres tipos de sustrato en ambiente controlado y su viabilidad en la región Moquegua. Enf. UTE. 11 (4): 37-47. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n4.642>

**RECIBIDO / RECEIVED:** 03/02/2023

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 29/01/2024



## Feeding habits of bonito *Euthynnus alletteratus* and albacore *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) in the Colombian Caribbean

### Hábitos alimentarios del bonito *Euthynnus alletteratus* y la albacora *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) en el Caribe colombiano

Santiago González-Rojas<sup>1,2\*</sup>, Jorge Paramo<sup>1</sup>, Silvia Salas C.<sup>1</sup>, Sigmer Quiroga<sup>2</sup>,

0000-0002-0027-551X

0000-0002-8380-2716

0000-0002-4263-5050

0000-0002-3321-1360

José Cusba<sup>1,3</sup>, Samuel Núñez<sup>1,2</sup> y Adolfo Sanjuan-Muñoz<sup>4</sup>

0000-0003-0445-7879

0000-0003-2562-9561

0000-0002-4786-862X

1. Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología Tropical -Citept-, Universidad del Magdalena, Cra. 32 No. 22-08, Avenida del Ferrocarril, Santa Marta, Colombia. [sangor21@gmail.com](mailto:sangor21@gmail.com)\*
2. Grupo de Investigación en Manejo y Conservación de Fauna, Flora y Ecosistemas Estratégicos Neotropicales -Miku-, Universidad del Magdalena. Carrera 32 No 22-08, Santa Marta, Colombia.
3. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés"-Invemar, Programa Calidad Ambiental Marina, Calle 25 No. 2-55 Rodadero, Santa Marta, Colombia.
4. Grupo de Investigación Dinámica y Manejo de Ecosistemas Marinos Costeros (Dimarco), Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Cra. 2 No. 11-68. Edificio Mundo Marino. Santa Marta, Colombia.

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Se evaluaron los hábitos alimentarios del bonito *Euthynnus alletteratus* y la albacora *Thunnus alalunga* a partir del análisis de los contenidos de 85 estómagos (50 de bonito y 35 de albacora) recolectados entre marzo de 2018 y abril de 2019. Se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de las presas encontradas en dichos estómagos, así como del espectro trófico entre especies y temporadas climáticas. La información climática se obtuvo a través de imágenes satelitales, analizando variables como la temperatura superficial del mar, la salinidad y los vientos. En términos de abundancia, las presas más representativas fueron el pez *Sardinella aurita* (42.48 %) y restos de Teleostei (27.45 %) para *E. alletteratus*, y larvas megalopa (56.89 %) y restos de Teleostei (10.26 %) para *T. alalunga*. El índice de importancia relativa indica, como presas principales, a restos de Teleostei (IRI = 1460.65) y *Sardinella aurita* (IRI = 1179.70) para *E. alletteratus*, y a larvas megalopa (IRI = 1367.19) y restos de Teleostei (IRI = 840.94) para *T. alalunga*. Estos grandes depredadores pelágicos fueron catalogados como generalistas, con baja diversidad de presas en el contenido estomacal, y no se observó solapamiento trófico entre las dos especies.

**PALABRAS CLAVE:** atunes, peces pelágicos, dieta, Caribe

#### ABSTRACT

The feeding habits of the bonito *Euthynnus alletteratus* and the albacore *Thunnus alalunga* were assessed by analyzing the contents of 85 stomachs (50 from bonito and 35 from albacore) collected between March 2018 and April 2019. A qualitative and quantitative analysis of the prey found in the stomach contents was conducted, as well as of the trophic spectrum between species and climatic seasons. Climatic information was obtained through satellite images, analyzing variables such as sea surface temperature, salinity, and winds. In terms of abundance, the most representative prey were the fish *Sardinella aurita* (42.48 %) and Teleostei remains (27.45 %) for *E. alletteratus*, and Megalopa larvae (56.89 %) and Teleostei remains (10.26 %) for *T. alalunga*. The relative importance index indicates that the main prey for *E. alletteratus* were Teleostei remains (IRI = 1460.65) and *Sardinella aurita* (IRI = 1179.70), while, for *T. alalunga* they were megalopa larvae (IRI = 1367.19) and Teleostei remains (IRI = 840.94). These large pelagic predators were classified as generalists, with a low prey diversity in their stomach content. No trophic overlap was observed between the two species.

**KEYWORDS:** tunas, pelagic fish, diet, Caribbean

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1316>

Publicado por Invemar

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by Invemar

This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

## INTRODUCCIÓN

La pesca deportiva es una actividad que involucra atraer, capturar y liberar peces. En Colombia, se practica en el 80 % del territorio nacional, tanto en agua dulce como en ambientes marinos (Lasso *et al.*, 2019). En el Caribe colombiano, la pesca deportiva artesanal es una actividad dual: se practica para efectos de sustento y turismo. Los pescadores artesanales utilizan métodos tradicionales como el cebo vivo para capturar róbalo, pargos y sierras (Lasso *et al.*, 2019). Estos pescados se venden en los mercados locales o se consumen en casa. La pesca deportiva también es una actividad turística importante en el Caribe colombiano; tanto turistas nacionales como extranjeros visitan la región para practicar la pesca recreativa (Lasso *et al.*, 2019). Esta actividad genera ingresos económicos para las comunidades locales y contribuye al desarrollo del turismo sostenible. Entre las especies más frecuentemente capturadas por pesca deportiva en el Caribe colombiano están el bonito, la albacora, el dorado y otros peces pelágicos pequeños (Paramo *et al.*, 2019).

El bonito, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque), y la albacora, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre), son atunes epipelágicos y neríticos. Son especies altamente migratorias, distribuidas a lo largo del océano Atlántico (*E. alletteratus*) o regiones circuntropicales (*T. alalunga*) (Vieira *et al.*, 2021), que habitan aguas templadas y subtropicales en sus etapas juveniles. Una vez alcanzan las etapas adultas, se pueden encontrar en aguas subsuperficiales y a profundidades de aproximadamente 200 m (Bertrand *et al.*, 2002; Vieira *et al.*, 2021). Estas especies son depredadores oportunistas y se alimentan de una gran diversidad de presas. Las dietas del bonito y la albacora han sido descritas en diferentes partes del mundo (Consoli *et al.*, 2008; Young *et al.*, 2010; Varghese *et al.*, 2014; Varela *et al.*, 2017), pero aún hay un número limitado de estudios sobre sus hábitos alimentarios. Pocos trabajos se han concentrado en los cambios en su dieta con respecto a las temporadas climáticas (García y Posada, 2013). En general, estos peces se alimentan principalmente de crustáceos, peces y cefalópodos. En algunos casos, las principales presas que se encuentran en sus estómagos son restos de peces óseos, peces como *Engraulis japonicus* y cefalópodos como *Gonatopsis borealis* (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). Todo esto, de acuerdo con el índice de importancia relativa (IIR) de estas especies (Pinkas, 1971; Martínez-Juárez *et al.*, 2023).

Algunas especies de atún, como el bonito, son abundantes en el mar Mediterráneo y son de gran importancia ecológica y comercial, pues son depredadores de la porción superior de la red trófica (Báez *et al.*, 2021). Estos atunes son especies costeras, por lo que son capturados por medio de distintas artes de pesca. En el caso de Colombia, son pescados

## INTRODUCTION

Recreational fishing is an activity that involves attracting, capturing, and releasing fish. In Colombia, it is practiced in 80 % of the national territory, both in freshwater and marine environments (Lasso *et al.*, 2019). In the Colombian Caribbean, artisanal recreational fishing is a dual activity: it is practiced for livelihood and tourism purposes. Artisanal fishermen use traditional methods, such as live bait, to catch fish such as snooks, snappers, and Spanish mackerels (Lasso *et al.*, 2019). These fish are sold in local markets or consumed at home. Sport fishing is also a significant touristic activity in the Colombian Caribbean; both national and foreign tourists visit the region to engage in recreational fishing (Lasso *et al.*, 2019). This activity generates economic income for local communities and contributes to the development of sustainable tourism. Among the species most caught by recreational fishing in the Colombian Caribbean are little tunny, albacore, dorado, and other small pelagic fish (Paramo *et al.*, 2019).

The little tunny, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque), and the albacore, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre), are epipelagic, neritic tuna. They are highly migratory species, distributed across the Atlantic ocean (*E. alletteratus*) or circumtropical areas (*T. alalunga*) (Vieira *et al.*, 2021), inhabiting temperate and subtropical waters in their juvenile stages. Once they reach the adult stages, they are found in subsurface waters and at depths of around 200 m (Bertrand *et al.*, 2002; Vieira *et al.*, 2021). These species are opportunistic predators and eat a great diversity of prey. The diet of the little tunny and the albacore has been described in different parts of the world (Consoli *et al.*, 2008; Young *et al.*, 2010; Varghese *et al.*, 2014; Varela *et al.*, 2017), but there is still a limited number of studies on their feeding habits, and few works have focused on the changes in their diet with respect to climatic seasons (García and Posada, 2013). In general, these fish feed mainly on crustaceans, fish, and cephalopods. In some cases, the main prey found in their stomachs are bony fish remains, fish such as *Engraulis japonicus*, and cephalopods such as *Gonatopsis borealis* (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). All this, according to these species' relative importance index (RII) (Pinkas, 1971; Martínez-Juárez *et al.*, 2023).

Some species of tuna, such as the small tuna, are abundant in the Mediterranean Sea, with great commercial and ecological importance, as they are predators of the upper portion of the trophic web (Báez *et al.*, 2021). These tunas are coastal species, so they are caught by several types of fishing gear. In the case of Colombia, they are caught by small artisanal boats using nets and rods. This fishery product is used

mediante pequeños botes artesanales con redes y cañas. Este producto pesquero se utiliza principalmente para el consumo propio. Para el Caribe colombiano, los estudios sobre los hábitos alimentarios de estas dos especies son escasos (García y Posada, 2013). Con base en análisis del contenido estomacal, la dieta de *Euthynnus alleteratus* se compone principalmente de presas de las familias Clupeidae (*Harengula* sp., *Sardinella aurita*, *Opisthonema oglinum*) y Carangidae (*Decapterus* sp.) (Moreno, 1986). Otro estudio muestra que la dieta de *E. alleteratus* en el Caribe colombiano contiene principalmente especies de las familias Clupeidae (*Jenkinsia lamprotaenia* y *Sardinella aurita*), Carangidae (*Decapterus* sp.) y Mugilidae (*Mugil curema* y *Mugil* sp.) (García y Posada, 2013; Posada, 2017). En el caso de *T. alalunga* no se han realizado estudios sobre sus hábitos alimentarios en esta región. El objetivo de esta investigación fue evaluar los hábitos alimentarios de *E. alleteratus* y *T. alalunga* a través de un análisis cuantitativo (numérico, gravimétrico y de frecuencia relativa) de su dieta y diversidad, amplitud y similitud trófica para la región de Santa Marta en el Caribe colombiano.

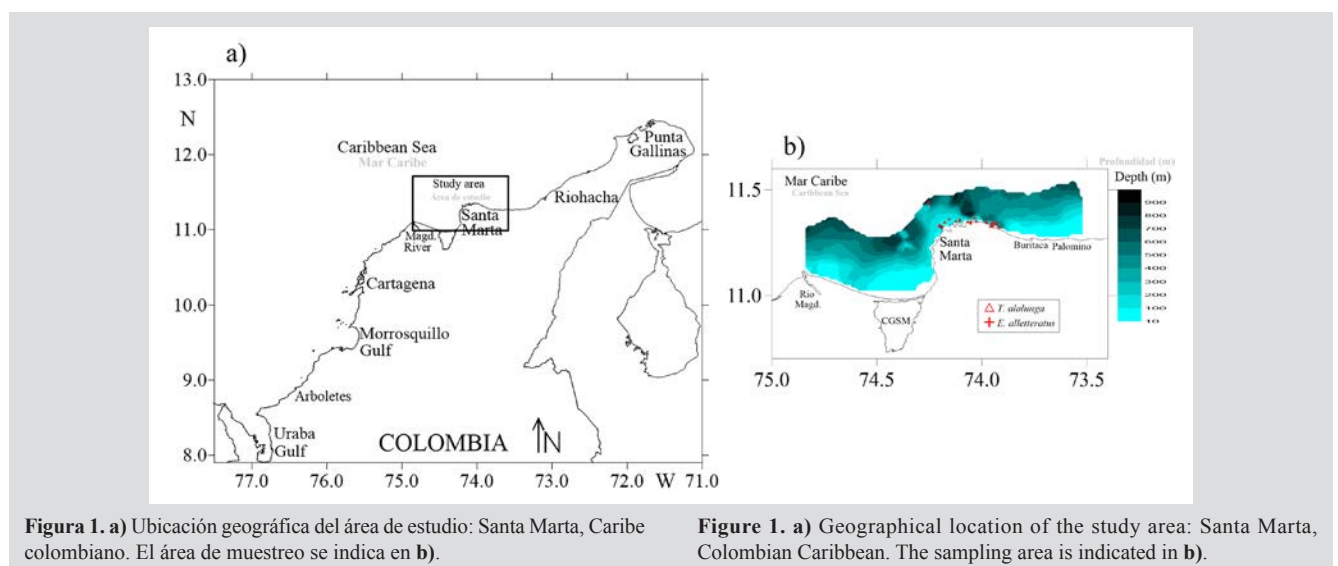
## ÁREA DE ESTUDIO

Santa Marta está ubicada en la costa Caribe de Colombia, en el departamento de Magdalena (Figura 1). Esta área está gobernada por dos periodos climáticos: una temporada seca y una temporada lluviosa, bajo la influencia del desplazamiento norte – sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Franco-Herrera, 2005; Paramo *et al.*, 2009). Cuando la ZCIT se mueve hacia el sur, los vientos alisios del nororiente influyen la región (temporada seca). Cuando la ZCIT se mueve hacia el norte, los vientos son más débiles, promoviendo la precipitación (temporada lluviosa) (Franco-Herrera, 2005).

mainly for own consumption. For the Colombian Caribbean, studies on the feeding habits of these two species are scarce (García and Posada, 2013). The diet of *E. alleteratus*, based on stomach content analyses, is mainly made up of prey items from the families Clupeidae (*Harengula* sp., *Sardinella aurita*, *Opisthonema oglinum*) and Carangidae (*Decapterus* sp.) (Moreno, 1986). Another study shows that the diet of *E. alleteratus* in the Colombian Caribbean mainly comprises species from the families Clupeidae (*Jenkinsia lamprotaenia* and *S. aurita*), Carangidae (*Decapterus* sp.), and Mugilidae (*Mugil curema* and *Mugil* sp.) (García and Posada, 2013; Posada, 2017). In the case of *T. alalunga*, no studies have been conducted with regard to feeding habits in this region. The objective of this research was to evaluate the feeding habits of *E. alleteratus* and *T. alalunga* through a quantitative analysis (numerical, gravimetric, and relative frequency) of their diets and diversity, amplitude, and trophic similarity for the region of Santa Marta in the Colombian Caribbean.

## STUDY AREA

Santa Marta is located on the Caribbean coast of Colombia, in the department of Magdalena (Figure 1). This area is governed by two climatic periods: a dry season and a rainy season, influenced by the north – south displacement of the intertropical convergence zone (ITCZ) (Franco-Herrera, 2005; Paramo *et al.*, 2009). When the ITCZ moves to the south, the northeast trade winds influence the region (dry season), and, when the ITCZ moves to the north, the winds are lower, promoting precipitation (rainy season) (Franco-Herrera, 2005).



## MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron estómagos de *E. alletteratus* y *T. alalunga* entre marzo de 2018 y abril de 2019 frente a la costa de Santa Marta. Los especímenes fueron capturados durante el día utilizando cañas de pescar con cebo vivo y cebos artificiales, una técnica común en la pesca recreativa (Klett-Traulsen *et al.*, 1996; Lloret *et al.*, 2008). Con el fin de identificar variaciones por temporadas en los hábitos alimentarios de las especies mencionadas, se obtuvieron datos de temperatura y salinidad *in situ* mediante un CTD (Castaway). Adicionalmente, se obtuvieron registros mensuales de temperatura superficial del mar (TSM), salinidad superficial del mar (SSM) y vientos a partir de datos satelitales. La información de TSM fue capturada diariamente mediante el MODIS-Aqua sensor del sitio web Ocean Color (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>), con una resolución espacial de ~4 km. La salinidad superficial se obtuvo del Servicio de Monitoreo Ambiental Marino (Copernicus) de la Comisión Europea (<http://marine.copernicus.eu>), con una resolución espacial de ~9 km. Finalmente, la información de vientos (m/s) proviene de la base de datos del Reanálisis Regional Norteamericano (NARR, North American Regional Reanalysis; <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/NARR>), con una resolución espacial de 0.3° (~32 km).

Una vez capturado, cada individuo fue identificado y almacenado en hielo para conservación y transporte al laboratorio, donde fue sexado, medido (longitud total, LT, al mm más cercano) con cinta métrica y pesado (g) utilizando una balanza digital con una precisión de 0.1 g. Acto seguido, el estómago fue extraído, preservado y almacenado en formaldehído al 10 % (Hyslop, 1980). Las presas fueron extraídas de los estómagos, contadas, pesadas e identificadas, dependiendo del estado de digestión (Clothier, 1950), a la categoría taxonómica más baja mediante la literatura especializada (Manning, 1969; Méndez, 1981; Cervigón, 1992; Fischer *et al.*, 1995; Chirichigno y Vélez, 1998). El número mínimo de muestra se determinó empleando curvas de acumulación de presas, elaboradas a partir del número de estómagos analizados con el *software* EstimateS, versión 9.1.0 (Villareal *et al.*, 2004; Colwell *et al.*, 2012), con 999 permutaciones. Para determinar la representatividad del tamaño de la muestra se utilizó el coeficiente de variación. Los estómagos eran válidos cuando se encontraban al menos cinco unidades de muestra por debajo de 5 % (Ferry *et al.*, 1997). Adicionalmente, se realizó regresión lineal para confirmar que la pendiente no fuera significativamente diferente de cero (Bizarro *et al.*, 1997). Cuando se cumplían estas dos premisas, se consideraba una muestra como representativa. Se estimaron tres medidas de cantidad de presas: numérica (% N), gravimétrica

## MATERIALS AND METHODS

Stomachs of *E. alletteratus* and *T. alalunga* were collected between March 2018 and April 2019 off the coast of Santa Marta. The specimens were captured during daytime using fishing rods with live bait and artificial lures, a common technique in recreational fishing (Klett-Traulsen *et al.*, 1996; Lloret *et al.*, 2008). With the purpose of identifying seasonal variations in the feeding habits of the aforementioned species, temperature and salinity data were obtained *in situ* using a CTD (Castaway). In addition, monthly records of sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), and winds were obtained from satellite data. The SST information was captured on a daily basis via the MODIS-Aqua sensor from the Ocean Color website (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>), with a spatial resolution of ~4 km. The surface salinity was obtained from the Marine Environmental Monitoring Service (Copernicus) of the European Commission (<http://marine.copernicus.eu>), with a spatial resolution of ~9 km. Finally, the wind information (m/s) came from the North American Regional Reanalysis database (NARR, North American Regional Reanalysis; <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/NARR>), with a spatial resolution of 0.3° (~32 km).

Once captured, identified, and stored in ice for conservation and transport to the laboratory, each individual was sexed, measured (total length, TL, to the nearest mm) with a measuring tape, and weighed (g) using a digital weight with an accuracy of 0.1 g. Subsequently, the stomach was extracted, preserved, and stored in 10 % formaldehyde (Hyslop, 1980). Preys were extracted from the stomachs, counted, weighed, and identified, depending on the state of digestion (Clothier, 1950), to the lowest taxonomic category using the specialized literature (Manning, 1969; Méndez, 1981; Cervigón, 1992; Fischer *et al.*, 1995; Chirichigno and Vélez, 1998). The minimum sample size was determined by means of prey accumulation curves, which were elaborated based on the number of stomachs analyzed via the EstimateS software, version 9.1.0 (Villareal *et al.*, 2004; Colwell *et al.*, 2012), with 999 permutations. To determine the representativeness of the sample size, the coefficient of variation was employed. The stomachs were valid when at least five sample units were found below 5 % (Ferry *et al.*, 1997). Additionally, linear regression was performed to confirm that the slope was not significantly different from zero (Bizarro *et al.*, 1997). When these two premises were fulfilled, the sample was considered to be representative. Three relative measures of prey quantity were estimated: numerical (% N), gravimetric (% G), and frequency of occurrence (% OF) (Hyslop, 1980).



(% G) y de frecuencia de ocurrencia (% FO) (Hyslop, 1980). La importancia de cada presa fue evaluada utilizando el índice de importancia relativa (IIR), que emplea las tres medidas mencionadas (Pinkas *et al.*, 1971). Se implementó la ecuación estandarizada del índice de Levin para determinar la amplitud de nicho. La diversidad de dieta se evaluó calculando el índice Shannon-Wiener ( $H'$ ) (Krebs, 1999).

Las diferencias en las dietas de *E. alletteratus* y *T. alalunga* (con base en la abundancia de presas) fueron calculadas para cada temporada y clase de tamaño mediante la prueba de chi cuadrado y análisis de clústers. Se aplicó el índice Bray-Curtis para evaluar el grado de similitud en la abundancia de presas. Los datos fueron transformados logarítmicamente ( $\log x + 1$ ) para reducir la influencia de los ceros en las especies más abundantes (Páramo *et al.*, 2012).

Se utilizó el índice Morisita-Horn para determinar la superposición dietética ( $C\lambda$ ) (Krebs, 1999).

$$C\lambda = \frac{2 \sum_{i=1}^n (P_{xi} \times P_{yi})}{(\sum_{i=1}^n P_{xi}^2 + \sum_{i=1}^n P_{yi}^2)}$$

Esta superposición se determina a partir de los valores de los índices: cuando estos están entre 0 y 0.29, no indican superposición en el componente trófico, y los valores de 0.6 – 1 muestran una superposición biológicamente significativa (Krebs, 1999).

## RESULTADOS

Se encontraron cuatro temporadas climáticas relacionadas con la intensidad de los vientos, la temperatura y la salinidad. El periodo de más intensidad fue entre diciembre y marzo, con valores entre 7.2 y 11.1 m/s. Esto corresponde a la temporada seca principal (MaD), que se asocia con valores más bajos de temperatura superficial del mar (24.5 – 26.8 °C) y salinidad (35.8 – 36.1). La temporada seca menor (MinD), entre julio y agosto, presenta valores medios de intensidad de vientos en el rango de 6.8 a 7.4 m/s, temperatura superficial del mar entre 26.7 y 27.8 °C y salinidades de 35.5 – 36.1. La temporada con vientos de baja intensidad (abril a junio) está asociada con lluvias menores (MinR), con valores entre 4.0 y 7.8 m/s, temperaturas superficiales del mar entre 26.5 y 27.7 °C y salinidades entre 35.8 y 36.7. La temporada de menor intensidad de vientos ocurrió entre septiembre y noviembre (1.3 y 6.4 m/s), lo que corresponde a lluvias significativas (MaR), con las temperaturas más altas (27.9 y 29.0 °C) y los valores más bajos de salinidad (35.7 y 35.9) en toda el área (Figura 2).

The importance of each item prey was calculated using the relative importance index (RII), which uses the three measures mentioned above (Pinkas *et al.*, 1971). The standardized equation of the Levin index was implemented to determine the niche breadth, and diet diversity was assessed by calculating the Shannon-Wiener index ( $H'$ ) (Krebs, 1999).

The differences in the diets of *E. alletteratus* and *T. alalunga* (based on prey abundance) were calculated for each season and size class via the chi-squared test and cluster analysis. The Bray-Curtis index was applied to assess the degree of similarity in prey abundance. The data were log-transformed ( $\log x + 1$ ) to reduce the influence of zeros in the more abundant species (Paramo *et al.*, 2012).

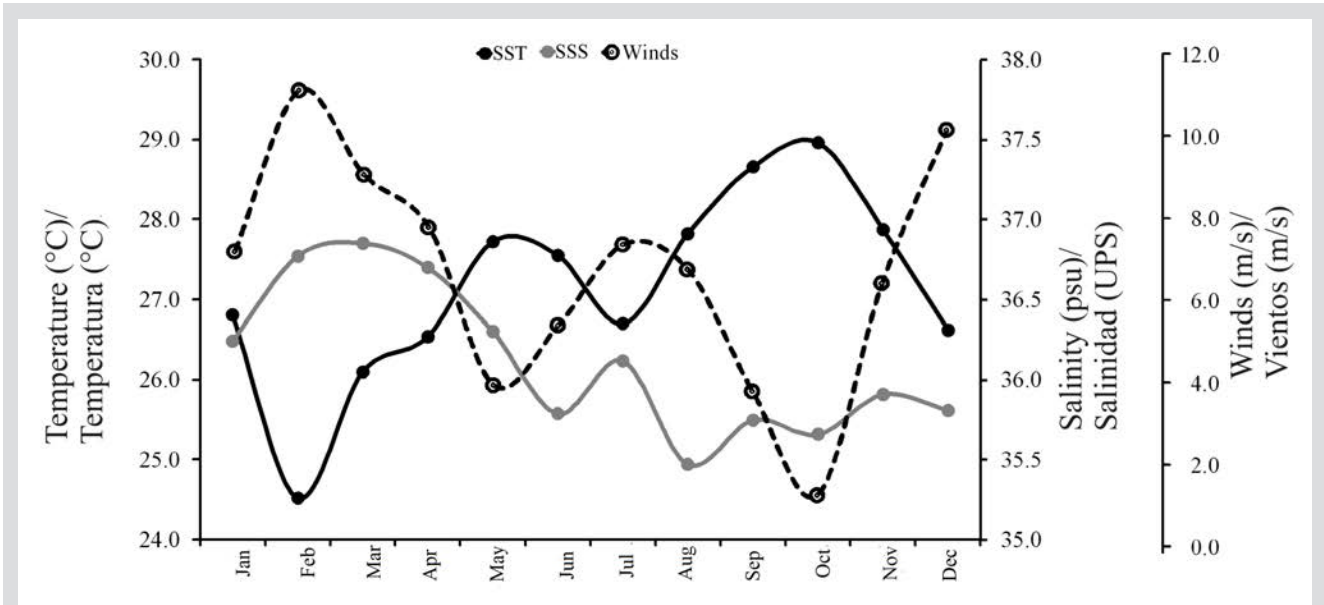
The Morisita-Horn index was used to determine the dietary overlap ( $C\lambda$ ) (Krebs, 1999).

$$C\lambda = \frac{2 \sum_{i=1}^n (P_{xi} \times P_{yi})}{(\sum_{i=1}^n P_{xi}^2 + \sum_{i=1}^n P_{yi}^2)}$$

This overlap is determined based on the index values: when the values are between 0 and 0.29, they indicate no overlap in the trophic component, and values of 0.6 to 1 show a biologically significant overlap (Krebs, 1999).

## RESULTS

Four climatic seasons related to the intensity of the winds, temperature, and salinity were found. The period of greatest intensity was between December and March, with values between 7.2 and 11.1 m/s. This corresponds to the major dry season (MaD), which is associated with lower sea surface temperature (24.5–26.8 °C) and higher salinity values (35.8–36.8). The minor dry season (MinD), between July and August, exhibits medium wind intensity values ranging from 6.8 to 7.4 m/s, with sea surface temperature values between 26.7 and 27.8 °C and salinities of 35.5 – 36.1. The season with low-intensity winds (April to June) is associated with minor rainfall (MinR), with values between 4.0 and 7.8 m/s, sea surface temperatures between 26.5 and 27.7 °C, and salinities between 35.8 and 36.7. The season with the lowest wind intensity occurred between September and November (1.3 and 6.4 m/s), which corresponds to major rainfall (MaR), with the highest temperatures (27.9 and 29.0 °C) and the lowest salinity values (35.7 and 35.9) in the entire area (Figure 2).

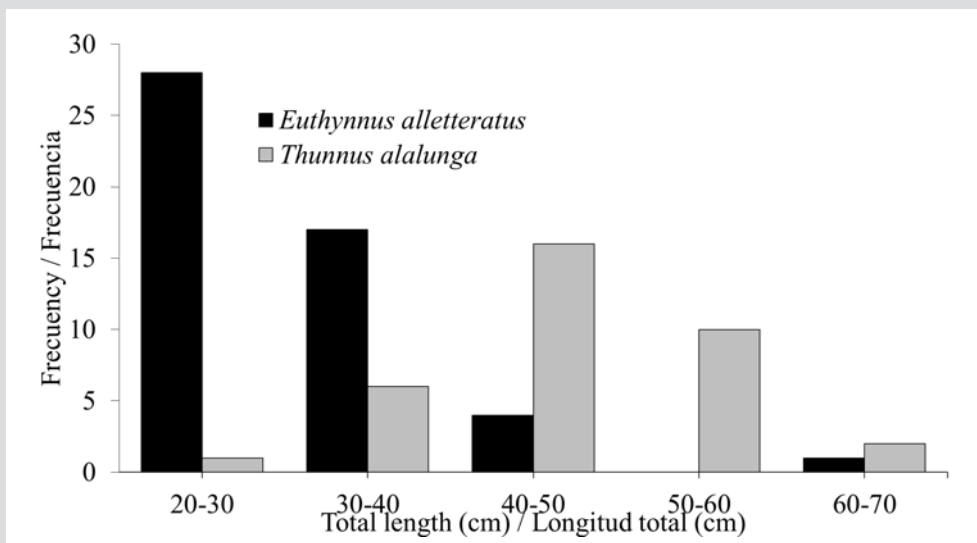


**Figura 2.** Variación mensual en TSM, SSM e intensidad de vientos (m/s) en el área marina de Santa Marta, Caribe colombiano. Temporada seca principal (diciembre – febrero), temporada seca menor (julio – agosto), temporada lluviosa menor (abril – junio) y temporada lluviosa principal (septiembre – noviembre).

**Figure 2.** Monthly variation in SST, SSS, and wind intensity (m/s) in Santa Marta's marine region, Colombian Caribbean. Major dry season (December – February), minor dry season (July – August), minor rainy season (April – June), and major rainy season (September – November).

Se recolectaron 85 estómagos de atún, 50 de *E. alletteratus* y 35 de *T. alalunga*. El tamaño de *E. alletteratus* varió entre 24.5 y 63.0 cm (media:  $31.96 \pm 6.66$  cm), mientras que el de *T. alalunga* fueron mayores, oscilando entre 42.0 y 63.0 cm (media:  $50.39 \pm 6.43$  cm). Las dos especies de atún estuvieron agrupadas en cinco clases (20 – 30, 30 – 40, 40 – 50, 50 – 60, 60 – 70 cm) (Figura 3). *Euthynnus alleteratus* presentó una FO de 58 % en la clase de 20 – 30 cm, 32 % en la clase de

85 tuna stomachs were collected, 50 of *E. alletteratus* and 35 of *T. alalunga*. The size of *E. alletteratus* varied between 24.5 and 63.0 cm (mean:  $31.96 \pm 6.66$  cm), while the sizes of *T. alalunga* were greater, ranging between 42.0 and 63.0 cm (mean  $50.39 \pm 6.43$  cm). The two tuna species were grouped into five classes (20 – 30, 30 – 40, 40 – 50, 50 – 60, 60 – 70 cm) (Figure 3). *Euthynnus alleteratus* exhibited an OF of 58 % in the 20 – 30 cm class, 32 % in the 30 – 40 cm class, and only 8



**Figura 3.** Estructura de tallas de *E. alletteratus* y *T. alalunga* en Santa Marta

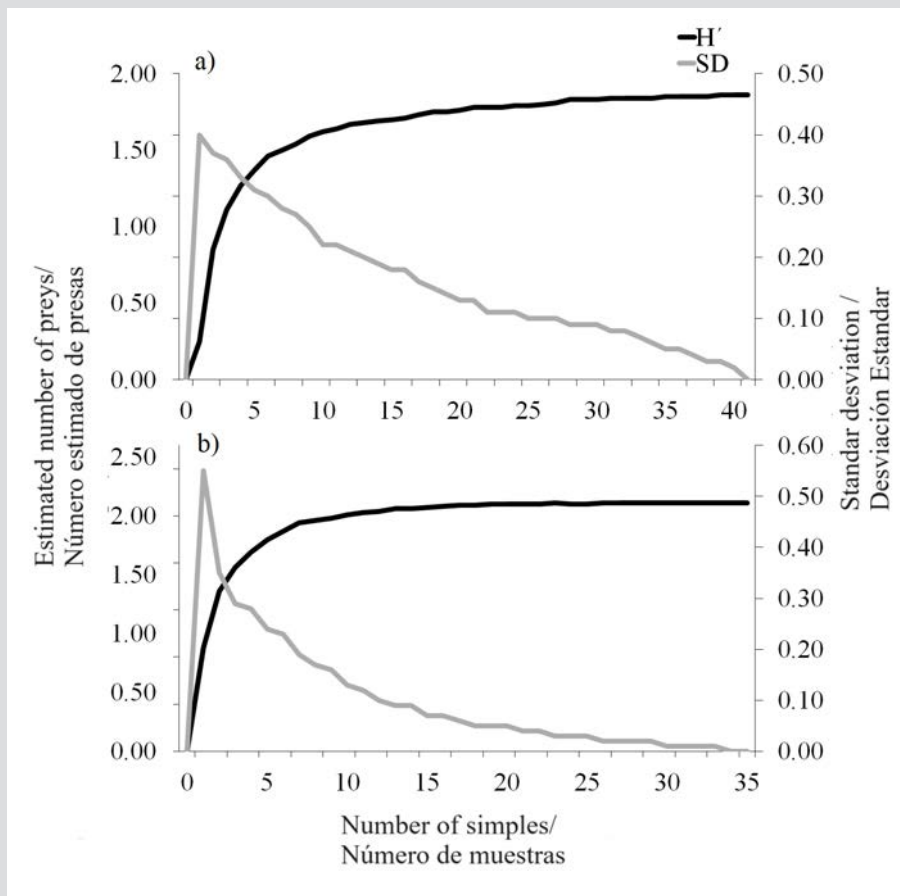
**Figure 3.** Size structure of *E. alletteratus* and *T. alalunga* in Santa Marta

30–40 cm y solo 8 y 2 % en las clases de 40–50 y 60–70 cm. No se capturaron individuos de la clase de 50–60 cm (Figura 3). *Thunnus alalunga* mostró una mayor frecuencia en las clases de tamaño de 20–30 cm (29 %), seguidas de la clase de 30–40 cm (26 %) y las de 50–60 (14 %) y 60–70 cm (3 %).

Se analizaron 85 estómagos; 91 % (77 estómagos) contenían al menos una presa. De acuerdo con la curva de acumulación de especies de presa, *E. alletteratus* (Figura 4a) alcanzó la asíntota con 40 estómagos, mientras que *T. alalunga* la alcanzó con 30 (Figura 4b).

and 2 % in the 40–50 and 60–70 cm classes. No individuals in the 50–60 cm class were captured (Figure 3). *Thunnus alalunga* showed a higher frequency in size classes 20–30 and 40–50 cm (29 % each), followed by class 30–40 cm (26 %), and the 50–60 (14 %) and 60–70 cm (3 %) classes.

85 stomachs were analyzed, and 91 % (77 stomachs) contained at least one prey. According to the accumulation curve of prey item species, *E. alletteratus* (Figure 4a) reached an asymptote with 40 stomachs, while *T. alalunga* reached it with 30 stomachs (Figure 4b).



**Figura 4.** Curva de acumulación de presas y desviación estándar de **a)** bonito (*E. alletteratus*) y **b)** albacora (*T. alalunga*) en Santa Marta

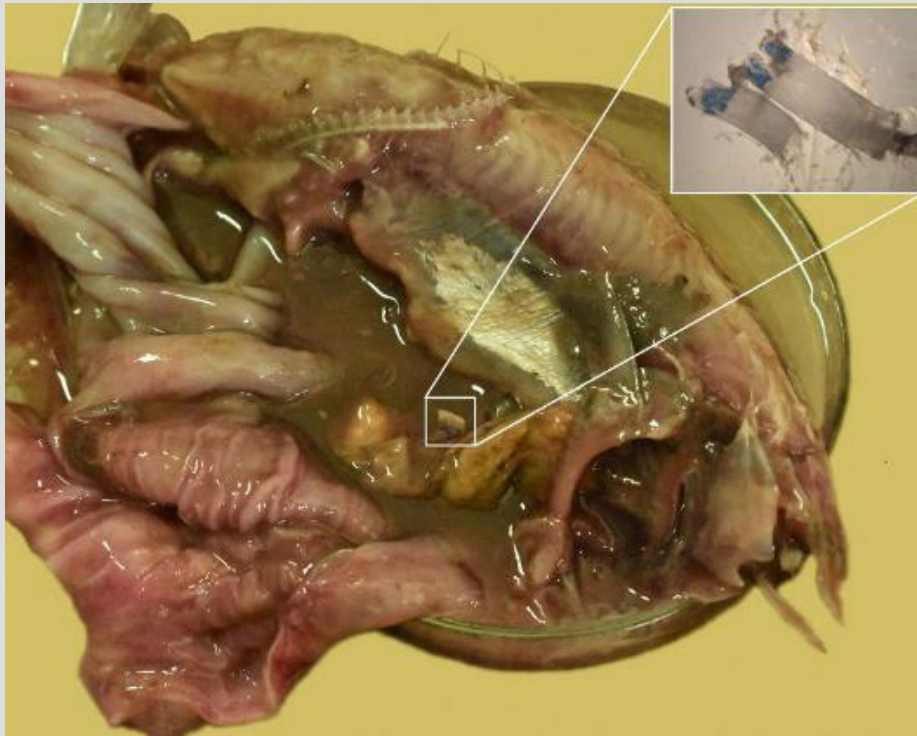
**Figure 4.** Prey accumulation curve and standard deviation of **a)** bonito (*E. alletteratus*) and **b)** albacore (*T. alalunga*) in Santa Marta

En los estómagos analizados se encontraron 494 presas, lo que permitió identificar 14 ítems de alimento, de los cuales cinco pertenecían a la clase Malacostraca, cinco a la clase Actinopterygii, tres a la clase Cephalopoda, uno a Gastropoda y uno a Algae. Las larvas megalopa fueron la presa dominante en ambas especies. *Sardinella aurita* (42 %) y restos de Teleostei (27 %) fueron las presas dominantes en el contenido estomacal de *E. alletteratus*. Las larvas megalopa

In the stomachs analyzed, 494 preys were found, which allowed identifying 14 food items, out of which five belonged to the class Malacostraca, five to the class Actinopterygii, three to the class Cephalopoda, one to Gastropoda, and one to Algae. Megalopa larvae were the dominant prey item of the two species. *Sardinella aurita* (43 %) and Teleostei remains (28 %) were the dominant prey items in the stomach content of *E. alletteratus*. Megalopa

(5 %) y restos de Teleostei (10 %) fueron la presa dominante en el contenido estomacal de *T. alalunga*. Se observaron residuos plásticos (0.0027 g) (Figura 5) en el estómago de un individuo de *E. alletteratus*.

larvae (57 %) and Teleostei remains (10 %) were the dominant prey items in the stomach content of *T. alalunga*. Plastic residues (0.0027 g) (Figure 5) were observed in the stomach of one *E. alletteratus* individual.



**Figura 5.** Residuos plásticos encontrados en el contenido estomacal de un ejemplar de bonito *E. alletteratus* de Santa Marta. Código de colección PESD – 0021, ubicación: 74°1.6'36" W y 11°20.8'48" N.

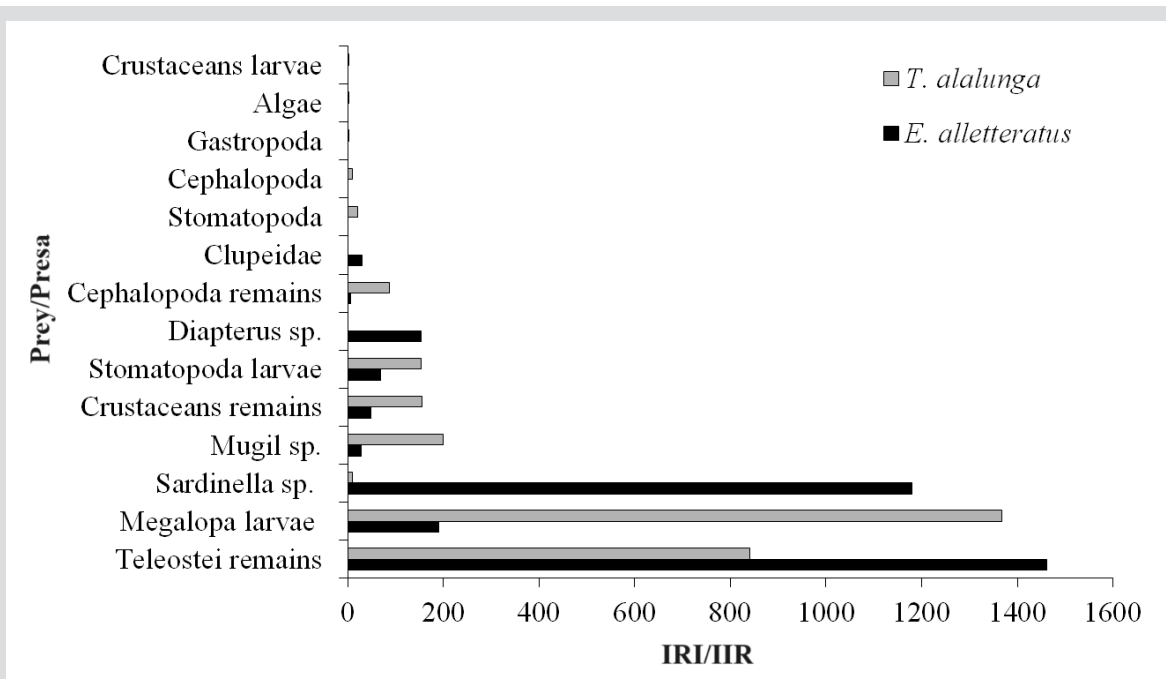
**Figure 5.** Plastic residues found in the stomach contents of bonito *E. alletteratus* from Santa Marta. Collection code PESD – 0021, location: 74°1.6'36" W and 11°20.8'48" N.

Se encontró al menos una presa en 91 % de los estómagos de individuos tanto machos como hembras de *E. alletteratus*; solo 9 % de los estómagos estaba vacío. De los estómagos de los individuos indeterminados, 40 % estaba lleno y 60 % estaba vacío. La dieta de los machos consistió de ocho ítems, donde *S. aurita* era el más representativo. En el caso de las hembras, la dieta consistió en seis ítems, también con *S. aurita* como el más representativo. La dieta de los individuos indeterminados se compuso de cinco ítems de alimento, siendo los restos de Teleostei los más representativos. Se encontró al menos una presa en el 95 % de los estómagos de machos de *T. alalunga*; 5 % de ellos estaba vacío. No obstante, en las hembras y los individuos indeterminados, todos los estómagos estaban llenos. La dieta de los machos consistió en ocho ítems, con larvas megalopa como el ítem más abundante. En el caso de las hembras, la dieta estuvo compuesta por 11 ítems, siendo las larvas el ítem más abundante. La dieta de los individuos indeterminados se compuso de siete ítems, con larvas megalopa y de Stomatopoda como las presas más abundantes.

At least one prey was found in 91 % of the stomachs of male and female *E. alletteratus* individuals, with only 9 % of the stomachs empty. Out of the undetermined individuals' stomachs 40 % was full and 60 % empty. The diet of male specimens consisted of eight food items, with *S. aurita* being the most representative. In the case of the females, the diet consisted of six food items, also with *S. aurita* as the most representative. The diet of the undetermined individuals was composed of five food items, with the prey Teleostei remains being the most representative. At least one prey was found in 95 % of the male stomachs of *T. alalunga*, and 5 % of the stomachs were empty. However, in the females and undetermined individuals, all stomachs were full. The male diet consisted of eight food items, with megalopa larvae being the most abundant item. In the case of females, the diet was composed of 11 food items, with larvae as the most abundant prey. The diet of the undetermined individuals was composed of seven food items, with Megalopa and Stomatopoda larvae as the most abundant prey.

Los IIR de los atunes permitieron identificar los restos de Teleostei (994.01), las larvas megalopa (865.29) y *S. aurita* (247.11) como la presa principal. Se determinaron cuatro ítems como presa secundaria: larvas de Stomatopoda (102.64), restos de crustáceos (90.30), *Mugil* sp. (71.92) y *Diapterus* sp. (49.40). Para *E. alleteratus*, los restos de Teleostei (1460.65) y *S. aurita* (1179.70) fueron la presa más importante (Figura 6). Se encontraron seis presas secundarias: larvas megalopa (190.86), *Diapterus* sp. (152.56), larvas de Stomatopoda (68.20), Clupeidae (29.24) y *Mugil* sp. (07/28). Para *T. alalunga*, la presa principal fueron las larvas megalopa (1367.19) y los restos de Teleostei (840.94). Las presas secundarias fueron *Mugil* sp. (199.02), restos de crustáceos (155.85), larvas de Stomatopoda (152.63) y restos de Cephalopoda (23.48).

The RII of the tunas allowed identifying Teleostei remains (994.01), megalopa larvae (865.29), and *S. aurita* (247.11) as the main prey. Four items were determined as secondary prey: Stomatopoda larvae (102.64), crustacean remains (90.30), *Mugil* sp. (71.92), and *Diapterus* sp. (49.40). For *E. alleteratus*, Teleostei remains (1460.65) and *S. aurita* (1179.70) were the most important prey (Figure 6). Six secondary prey items were found: megalopa larvae (190.86), *Diapterus* sp. (152.56), Stomatopoda larvae (68.20), Clupeidae (29.24), and *Mugil* sp. (07/28). For *T. alalunga* the main prey were megalopa larvae (1367.19) and Teleostei remains (840.94), and the secondary prey were *Mugil* sp. (199.02), crustacean remains (155.85), Stomatopoda larvae (152.63), and Cephalopoda remains (23.48).



**Figura 6.** IIR de las categorías encontradas en el contenido estomacal de *E. alleteratus* y *T. alalunga*. IIR > 200, presa principal; IIR 21 – 200, presa secundaria, IIR 0 – 20, presa ocasional.

**Figure 6.** RII of the prey categories found in the stomach contents of *E. alleteratus* and *T. alalunga*. RII > 200, main prey; RII 21 – 200, secondary prey; RII 0 – 20, occasional prey.

Según el IIR, la presa más importante para la especie *E. alleteratus* fueron los peces y restos de Teleostei (Figura 7). La dieta de los bonitos en la clase de tamaño de 20 – 30 cm estuvo dominada por *S. aurita* y restos de Teleostei, con valores más bajos para larvas megalopa, Clupeidae, restos de crustáceos y larvas de Stomatopoda. En la clase de tamaño de 30 – 40 cm, la dieta estuvo compuesta por siete ítems, siendo los más abundantes megalopas, restos de Teleostei y *Mugil* sp., además de larvas de Stomatopoda, restos de

Based on the RII, the most important prey for *E. alleteratus* were fish and Teleostei remains (Figure 7). The diet of bonitos in class 20 – 30 cm was dominated by *S. aurita* and Teleostei remains, with lower RII values for megalopa larvae, Clupeidae, crustacean remains, and Stomatopoda larvae. In size class 30 – 40 cm, the diet was composed of seven food items, with Megalopa, Teleostei remains, and *Mugil* sp. being the most abundant, along with Stomatopoda larvae, crustacean remains, Clupeidae, and Cephalopoda

crustáceos, Clupeidae y restos de Cephalopoda. En la clase de tamaño de 40 – 50 cm, la dieta consistió en tres ítems: larvas de Stomatopoda, restos de Teleostei y larvas megalopa. Finalmente, en la clase de tamaño de 60 – 70 cm, la dieta estuvo exclusivamente compuesta por *Diapterus* sp. y restos de Teleostei (Figura 7).

remains. In size class 40 – 50 cm, the diet consisted of three food items: Stomatopoda larvae, Teleostei remains, and megalopa larvae. Finally, in size class 60 – 70 cm, the diet was composed exclusively of *Diapterus* sp. and Teleostei remains (Figure 7).

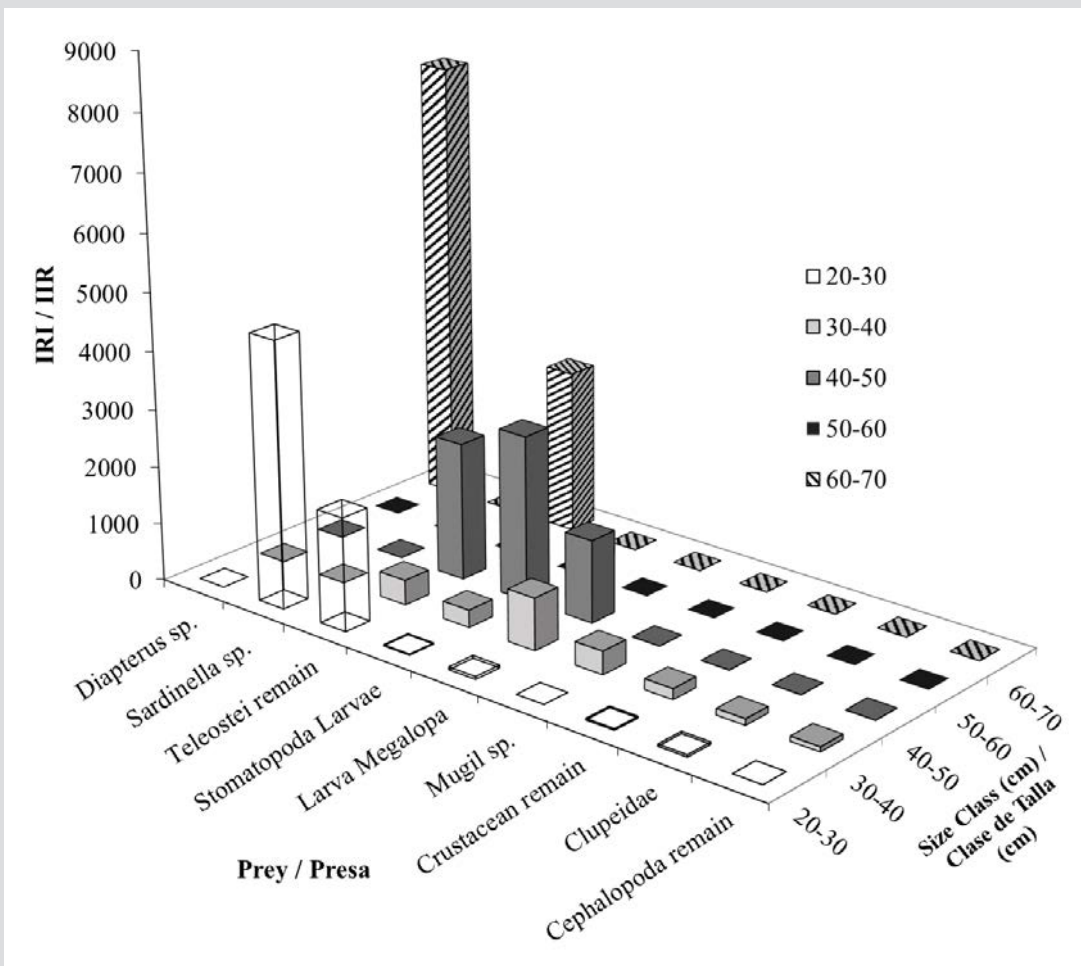


Figura 7. IIR de las categorías de presa en las diferentes clases de tamaño de *E. alletteratus* y *T. alalunga*. IIR > 200, presa principal; IIR 21 – 200, presa secundaria; IIR 0 – 20, presa ocasional.

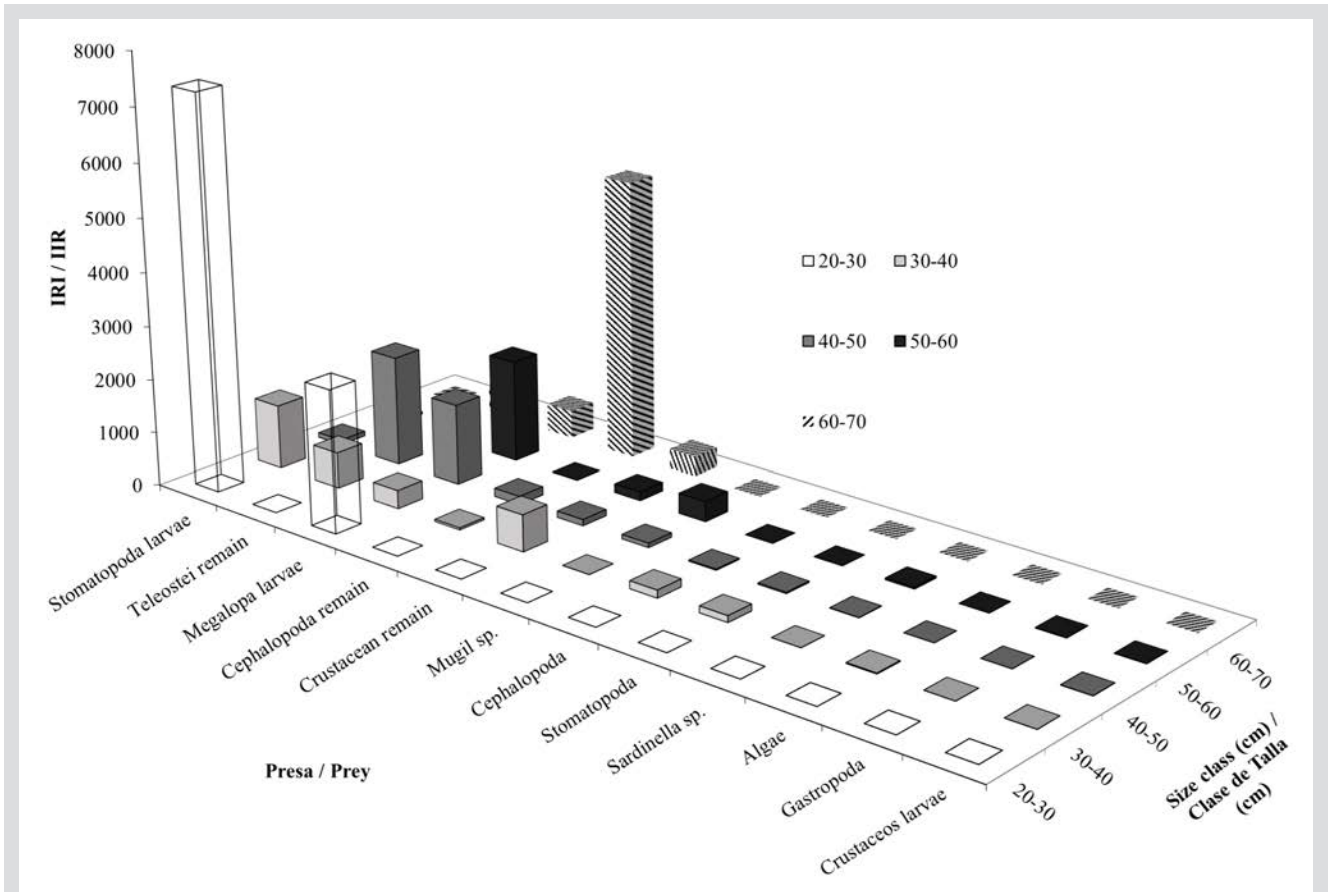
Figure 7. RII of the prey categories in the different size classes of *E. alletteratus* and *T. alalunga*. RII > 200, main prey; RII 21 – 200, secondary prey; RII 0 – 20, occasional preys.

Las presas con el IIR más alto para *T. alalunga* fueron larvas de Stomatopoda y Megalopa y restos de Teleostei, Cephalopoda y crustáceos (Figura 8). En la clase de tamaño de 20 – 30 cm, la presa consistió únicamente en larvas de Stomatopoda y megalopas. La clase de tamaño de 30 – 40 cm estuvo asociada con Stomatopoda y restos de crustáceos y Teleostei, con poca representación de larvas megalopa y restos de Stomatopoda y Cephalopoda. Las presas en la clase de tamaño de 40 – 50 cm estuvieron principalmente compuestas por restos de Teleostei y larvas megalopa, con valores muy

The prey with the highest RII for *T. alalunga* were Stomatopoda and megalopa larvae and Teleostei, Cephalopoda, and crustacean remains (Figure 8). In size class 20 – 30 cm, the prey consisted only of Stomatopoda and megalopa larvae. The size class 30 – 40 cm was associated with Stomatopoda and crustacean and Teleostei remains, with little representation of megalopa larvae, Cephalopoda, and Stomatopoda and Cephalopoda remains. The prey in the 40 – 50 cm class was mainly composed of Teleostei remains and megalopa larvae, with very low values of crustacean

bajos de retos de crustáceos, larvas de Stomatopoda, *Mugil sp.*, restos de Cephalopoda, Stomatopoda, Cephalopoda, *S. aurita* y larvas de crustáceos. En la clase de tamaño de 60 – 70 cm, el mayor aporte de presas correspondió a restos de Cephalopoda, seguidos de larvas megalopa y restos de crustáceos (Figura 8).

remains, Stomatopoda larvae, *Mugil sp.*, Cephalopoda remains, Stomatopoda, Cephalopoda, *Sardinella sp.*, and crustacean larvae. In the 60 – 70 cm class, the greatest contribution of prey corresponded to Cephalopoda remains, followed by megalopa larvae and Teleostei and crustacean remains (Figure 8).

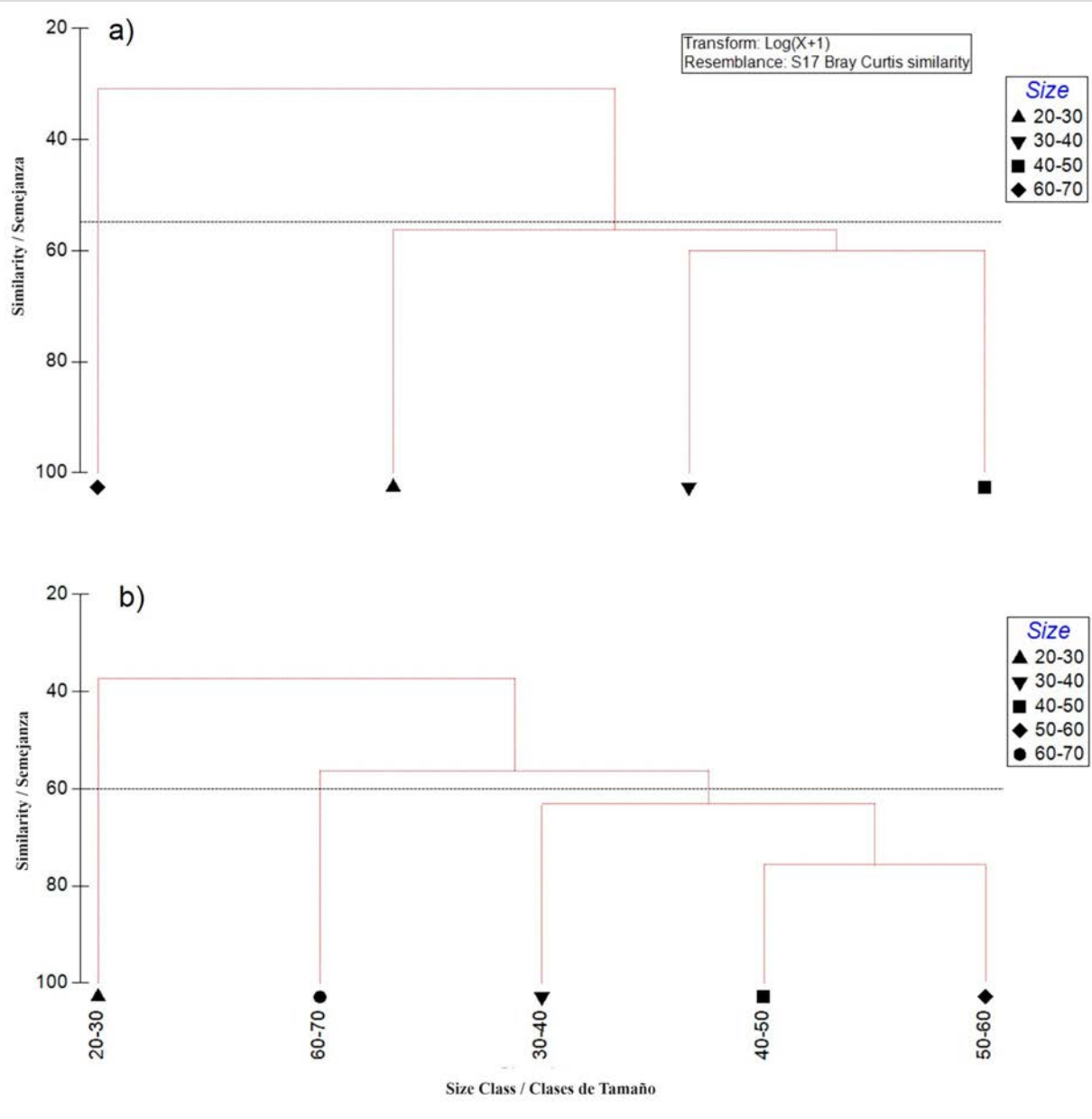


**Figura 8.** IIR de las categorías de presa en las diferentes clases de tamaño de la albacora *T. alalunga*.

**Figure 8.** RII of the prey categories in the different size classes of the albacore *T. alalunga*.

El dendrograma con los valores estandarizados de abundancia de presas ( $\log x + 1$ ) de *E. alletteratus* mostró la presencia de tres grupos para las diferentes clases de tamaño (similitud de 55 %), indicando la máxima similitud entre las dietas de las clases de tamaño de 30 – 40 y 40 – 50 cm (Figura 9a). La dieta de las clases de tamaño de 20 – 30 y 60 – 70 cm estuvo distribuida en diferentes grupos (< 60 %). El dendrograma de abundancia de presas para *T. alalunga* mostró la presencia de cuatro grupos principales en las diferentes clases de tamaño (similitud de 55 %), indicando la máxima similitud entre las dietas de las clases de tamaño de 40 – 50 y 50 – 60 cm (Figura 9b). La dieta de las clases de tamaño de 20 – 30, 30 – 40 y 60 – 70 cm estuvo distribuida en diferentes grupos (< 60 %).

The dendrogram with the standardized prey abundance values ( $\log x + 1$ ) of *E. alletteratus* showed the presence of three main groups for the different size classes (55 % similarity), indicating maximum similarities between the diet of the 30 – 40 and 40 – 50 cm size classes (Figure 9a). The diet of size classes 20 – 30 and 60 – 70 cm was distributed in different groups (< 60 %). The prey abundance dendrogram for *T. alalunga* showed the presence of four main groups in the different size classes (55 % similarity), indicating maximum similarities between the diet of size classes 40 – 50 and 50 – 60 cm (Figure 9b). The diet of the 20 – 30, 30 – 40, and 60 – 70 cm sizes classes was distributed in different groups (< 60 %).



**Figura 9.** Dendrograma de análisis de clúster que muestra el índice de similitud Bray-Curtis para las clases de tamaño de **a)** *E. alletteratus* y **b)** *T. alalunga*.

**Figure 9.** Cluster analysis dendrogram showing the Bray-Curtis similarity index for the size classes of **a)** *E. alletteratus* **b)** *T. alalunga*.

Se encontraron diferencias en la variación por temporadas respecto a la abundancia en el contenido estomacal de *E. alletteratus* (Tabla 1). Se encontraron diferencias significativas entre las temporadas MaD y MinD. El número total (% N) de presas como *S. aurita* y larvas de Stomatopoda muestra un cambio significativo a lo largo de las temporadas. Además, se encontraron diferencias entre MaD y MaR, pues el porcentaje N de las presas en el filo Arthropoda (larvas megalopa y de Stomatopoda y restos de crustáceos) y de los restos de Teleostei muestra cambios significativos (Tabla 1).

Differences in seasonal variation with regard to abundance were found in the stomach content of *E. alletteratus* (Table 1). Significant differences were found between the MaD and MinD seasons. The total number (% N) of prey such as *S. aurita* and Stomatopoda larvae shows a significant change over the seasons. Moreover, differences between MaD and MaR were found, as the % N of the prey in the phylum Arthropoda (megalopa and Stomatopoda larvae as well as crustacean remains) and Teleostei remains shows significant change (Table 1). Finally, significant differences



Finalmente, se encontraron diferencias significativas en MaD y MinR; el % N de presas como *S. aurita* y larvas megalopa muestra cambios significativos. La dieta de *E. alletteratus* se clasificó como generalista y no muy diversa en todas las temporadas (Tabla 2).

were observed in MaD and MinR; the % N of prey such as *S. aurita* and megalopa larvae shows significant change. The diet of *E. alletteratus* was classified as generalist and not very diverse in all seasons (Table 2).

**Tabla 1.** Diferencias por temporadas en la frecuencia de abundancia de presas para *E. alletteratus* y *T. alalunga*. Temporadas seca principal (MaD), seca menor (MinD), lluviosa principal (MaR) y lluviosa menor (MinR).

**Table 1.** Seasonal differences in the frequency of prey abundance for *E. alletteratus* and *T. alalunga*. Major dry (MaD), minor dry (MinD), major rainy (MaR), and minor rainy (MinR) seasons.

Especie / Species	Temporada / Season	X <sup>2</sup>	P
<i>E. alletteratus</i>	MaD – MinD	22.22	0.00**
	MaD – MaR	17.31	0.00**
	MaD – MinR	18.84	0.00**
	MinD – MaR	0.47	0.49*
	MinD – MinR	0.22	0.64
	MaR – MinR	0.05	0.82
<i>T. alalunga</i>	MaD – MinD	1.92	0.00**
	MaD – MaR	20.00	0.00**
	MaD – MinR	13.44	0.00**
	MinD – MaR	6.25	0.01*
	MinD – MinR	10.93	0.00**
	MaR – MinR	0.78	0.37

\*Valores de probabilidad de 0.05 ≥ P > 0.01.

\*\*Valores de probabilidad de 0.01 ≥ P.

\*Probability values of 0.05 ≥ P > 0.01.

\*\*Probability values of 0.01 ≥ P.

**Tabla 2.** Índices dietéticos de grupos de presas encontradas en los estómagos de *E. alletteratus*. % FO = frecuencia de ocurrencia, % N = porcentaje numérico, % P = porcentaje gravimétrico, IIR = índice de importancia relativa, B = índices estandarizados de Levin, H': diversidad de Shannon. Los valores totales se indican en negrita.

**Table 2.** Dietary indices of prey groups found in the stomachs of *Euthynnus alletteratus*. % OF = frequency of occurrence, % N = numerical percentage, % P = gravimetric percentage, RII = relative importance index, B = Levin's standardized indices, H': Shannon diversity. Total values are indicated in bold.

Ítem / Item	Seca principal / Major dry				Seca menor / Minor dry				Lluviosa principal / Major rainy				Lluviosa menor / Minor rainy			
	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR
<b>Arthropoda</b>	<b>24.40</b>	<b>14.00</b>	<b>0.61</b>	<b>148.90</b>	<b>37.50</b>	<b>37.50</b>	<b>1.30</b>	<b>810.20</b>	<b>81.90</b>	<b>81.30</b>	<b>87.74</b>	<b>4609.00</b>	<b>50.00</b>	<b>40.70</b>	<b>5.41</b>	<b>1279.90</b>
Larvas / Larvae megalopa	12.20	9.30	0.24	116.30	12.50	12.50	0.29	159.90	27.30	37.50	9.80	1290.10	30.00	33.30	2.37	1071.00
Larvas / Larvae Stomatopoda	4.90	1.60	0.17	8.40	25.00	25.00	1.01	650.30	27.30	25.00	49.51	2032.10	20.00	7.40	3.04	208.90
Restos de crustáceos / Crustacean remains	7.30	3.10	0.20	24.20					27.30	18.80	28.43	1286.80				

Ítem / Item	Seca principal / Major dry				Seca menor / Minor dry				Lluviosa principal / Major rainy				Lluviosa menor / Minor rainy			
	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR
<b>Chordata</b>	<b>75.60</b>	<b>86.20</b>	<b>99.38</b>	<b>4251.40</b>	<b>50.00</b>	<b>50.00</b>	<b>98.69</b>	<b>2805.90</b>	<b>9.10</b>	<b>6.30</b>	<b>7.84</b>	<b>128.10</b>	<b>50.00</b>	<b>59.30</b>	<b>94.59</b>	<b>7692.60</b>
<b>Clupeidae</b>	4.90	4.70	5.85	51.20												
<i>Diapterus</i> sp.	4.90	1.60	53.62	269.10												
<i>Mugil</i> sp.					12.50	12.50	98.30	1385.00								
<b>Restos / Remains Teleostei</b>	<b>34.10</b>	<b>29.50</b>	<b>25.48</b>	<b>1875.90</b>	<b>37.50</b>	<b>37.50</b>	<b>0.39</b>	<b>1420.90</b>	<b>9.10</b>	<b>6.30</b>	<b>7.84</b>	<b>128.10</b>	<b>50.00</b>	<b>59.30</b>	<b>94.59</b>	<b>7692.60</b>
<i>S. aurita</i>	31.70	50.40	14.43	2055.20												
<b>Mollusca</b>					<b>12.50</b>	<b>12.50</b>	<b>0.22</b>	<b>159.00</b>	<b>9.10</b>	<b>12.50</b>	<b>4.41</b>	<b>153.70</b>				
<b>Restos / Remains Cephalopoda</b>					12.50	12.50	0.22	159.00	9.10	12.50	4.41	153.70				
<b>Total de presas / Total prey</b>		129				8				16				27		
<b>B</b>		0.99				0.87				0.93				0.96		
<b>H'</b>		1.31				1.49				1.46				0.87		

Se encontraron diferencias en la variación por temporadas respecto a la abundancia en el contenido estomacal de *T. alalunga* (Tabla 1). Se encontraron diferencias significativas entre MaD y MinD, pues el % N de presas como las larvas megalopa y los restos de Teleostei muestra cambios significativos a través de las temporadas (Tablas 1 y 3). Se evidenciaron diferencias significativas en MaD y MinR, donde el % N de los restos de Teleostei mostró cambios significativos. Asimismo, se encontraron diferencias entre MinD y MinR; el % N de los restos de crustáceos, las larvas de Stomatopoda y los restos de Teleostei también muestra cambios significativos. Finalmente, se evidenciaron cambios significativos en MinD y MinR, pues el % N de las larvas megalopa y los restos de crustáceos y Teleostei muestra cambios significativos. La dieta de *T. alalunga* se clasificó como generalista y no muy diversa en todas las temporadas (Tabla 3).

Seasonal variation differences regarding abundance were found in the stomach content of *T. alalunga* (Table 1). Significant differences between MaD and MinD were found, as the % N of prey such as megalopa larvae and Teleostei remains shows significant change over the seasons (Tables 1 y 3). Significant differences were evidenced in MaD and MinR, with the % N of Teleostei remains showing significant change. Similarly, differences between MinD and MaR were found; the % N of crustacean remains, Stomatopoda larvae, and Teleostei remains also shows significant change. Finally, significant differences were evidenced in MinD and MinR, as the % N of megalopa larvae and crustacean and Teleostei remains shows significant change. The diet of *T. alalunga* was classified as generalist and not very diverse in all seasons (Table 3).



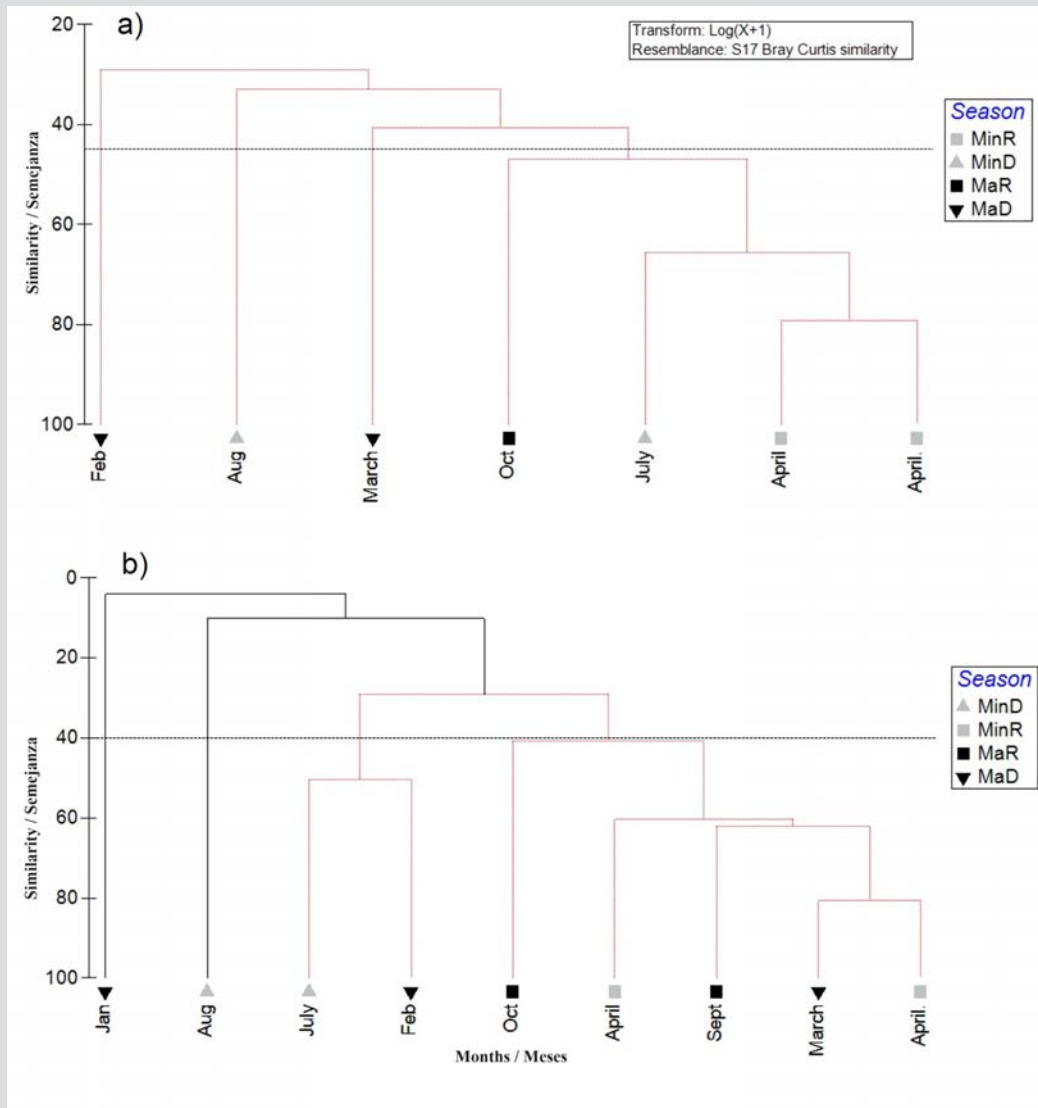
**Tabla 3.** Índices dietéticos de grupos de presas encontradas en los estómagos de *T. alalunga*. % FO = frecuencia de ocurrencia, % N = porcentaje numérico, % P = porcentaje gravimétrico, IIR = índice de importancia relativa, B = índices estandarizados de Levin, H': diversidad de Shannon. Los valores totales se indican en negrita.

**Table 3.** Dietary indices of prey groups found in the stomachs of *T. alalunga*. % OF = frequency of occurrence, % N = numerical percentage, % P = gravimetric percentage, RII = relative importance index, B = Levin's standardized indices, H': Shannon diversity. Total values are indicated in bold.

Ítem / Item	Seca principal / Major dry				Seca menor / Minor dry				Lluviosa principal / Major rainy				Lluviosa menor / Minor rainy			
	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR	% FO	% N	% P	IIR
<b>Algas / Algae</b>									<b>5</b>	<b>1.9</b>	<b>0</b>	<b>9.6</b>				
<b>Arthropoda</b>	<b>56.60</b>	<b>78.80</b>	<b>17.97</b>	<b>2269.60</b>	<b>57.20</b>	<b>66.70</b>	<b>1.95</b>	<b>1648.30</b>	<b>60.00</b>	<b>59.60</b>	<b>45.64</b>	<b>1805.90</b>	<b>61.50</b>	<b>79.10</b>	<b>15.47</b>	<b>2587.10</b>
<b>Larvas de crustáceos / Crustacean larvae</b>	3.30	0.70	0.43	3.90									3.80	0.80	0.25	4.20
<b>Larvas / Larvae megalopa</b>	28.30	66.40	5.97	2051.20	14.30	13.30	0.21	193.50	10.00	19.20	2.73	219.60	34.60	65.00	4.21	2395.70
<b>Larvas / Larvae Stomatopoda</b>	10.00	4.40	5.91	102.90	14.30	6.70	1.65	118.80	20.00	26.90	12.15	781.50	7.70	5.80	3.32	70.40
<b>Restos de crustáceos / Crustacean remains</b>	10.00	4.70	4.60	93.50	28.60	46.70	0.09	1336.00	20.00	7.70	28.57	725.20	7.70	2.50	6.46	68.90
<b>Stomatopoda</b>	5.00	2.60	1.06	18.10					10.00	5.80	2.19	79.60	7.70	5.00	1.23	47.90
<b>Chordata</b>	<b>16.10</b>	<b>63.51</b>	<b>45.06</b>	<b>1848.30</b>	<b>42.90</b>	<b>33.40</b>	<b>98.04</b>	<b>2295.50</b>	<b>15.00</b>	<b>9.60</b>	<b>20.31</b>	<b>448.90</b>	<b>34.60</b>	<b>13.30</b>	<b>69.18</b>	<b>2017.60</b>
<b>Mugil sp.</b>	3.30	4.70	5.68	34.80	14.30	6.70	95.40	1458.20					7.70	2.50	6.46	37.30
<b>Restos / Remains Teleostei</b>	9.50	57.31	31.20	1781.40	28.60	26.70	2.64	837.30	15.00	9.60	20.31	448.90	26.90	10.80	62.72	1980.30
<b>S. aurita</b>	3.30	1.50	8.18	32.10												
<b>Mollusca</b>	<b>10.00</b>	<b>5.40</b>	<b>10.85</b>	<b>44.10</b>					<b>16.90</b>	<b>37.39</b>	<b>29.35</b>	<b>466.90</b>	<b>7.60</b>	<b>5.00</b>	<b>17.11</b>	<b>85.10</b>
<b>Cephalopoda</b>	1.70	1.10	4.23	8.90					5.00	1.90	18.07	100.00	3.80	2.50	7.63	39.00
<b>Gastropoda</b>	1.70	0.70	0.14	1.40												
<b>Restos / Remains Cephalopoda</b>	6.60	3.60	6.48	33.80					11.90	35.49	11.28	366.90	3.80	2.50	9.48	46.10
<b>Total de presas / Total prey</b>	274				15				52				120			
<b>B</b>	0.99				0.93				0.98				0.99			
<b>H'</b>	1.32				1.34				1.76				130			

El dendrograma de los valores de abundancia de presas encontrados en el contenido estomacal de *E. alletteratus* muestra la presencia de seis grupos principales para las distintas clases de tamaño (< 50 % de similitud), indicando la máxima similitud entre MaR y MinD (Figura 10a). Para febrero, marzo, agosto y octubre, la dieta del bonito estuvo distribuida en diferentes grupos (< 50 %). El dendrograma de abundancia de las presas encontradas en el contenido estomacal de *T. alalunga* muestra la presencia de siete grupos principales para las diferentes temporadas climáticas (similitud de 40 %), indicando la máxima similitud entre MaD y MinR (Figura 10b). Para enero, abril, agosto, septiembre y octubre, la dieta de la albacora estuvo distribuida en diferentes grupos (40 %).

The dendrogram of the prey abundance values found in the stomach content of *E. alletteratus* shows the presence of six main groups for the different size classes (< 50 % similarity), indicating maximum similarities between MaR and MinD (Figure 10a). For February, March, August, and October, the diet of the bonito was distributed in different groups (< 50 %). The dendrogram of the prey abundance found in the stomach contents of *T. alalunga* shows the presence of seven main groups for the different climatic seasons (40 % similarity), indicating maximum similarities between MaD and MinR (Figure 10b). For January, April, August, September, and October, the diet of the albacore was distributed in different groups (40 %).



**Figura 10.** Dendrograma de análisis de clúster que muestra el índice de similitud Bray-Curtis para las presas encontradas en el contenido estomacal de a) *E. alletteratus* y b) *T. alalunga* en diferentes temporadas climáticas en Santa Marta.

**Figure 10.** Cluster analysis dendrogram showing the Bray-Curtis similarity index for the prey found in the stomach contents of a) *E. alletteratus* and b) *T. alalunga* in different climatic seasons in Santa Marta.

La amplitud de nicho mostró que las especies de atún tienen un comportamiento alimentario generalista ( $B_i = 0.998$ ). Se alimentan proporcionalmente de diferentes tipos de presa. Este comportamiento se encontró tanto en machos ( $B_i = 0.996$ ) como en hembras ( $B_i = 0.995$ ). Los índices de amplitud de nicho trófico para el bonito ( $B_i = 0.993$ ) y la albacora ( $B_i = 0.997$ ) son altos, lo que los clasifica como depredadores generalistas. Adicionalmente, el valor del índice Morisita-Horn ( $C\lambda = 0.5$ ) no muestra una superposición trófica alta entre las dos especies de atún, lo cual significa que estos depredadores no se están alimentando exactamente de la misma presa en el ecosistema pelágico.

## DISCUSIÓN

Hay pocas investigaciones sobre los hábitos alimentarios de *E. alletteratus* y *T. alalunga*. Pocos estudios se han concentrado en los cambios en su dieta respecto a temporadas climáticas. En general, las especies de atún como el bonito y la albacora son depredadores oportunistas que consumen una amplia variedad de presas (Varghese *et al.*, 2014). Este estudio es la primera comparación de la composición dietética de estas dos especies en el Caribe colombiano, el cual se basó en la caracterización de las presas encontradas en los contenidos estomacales y en datos de abundancia, dieta, nicho alimentario y cambios en la dieta. Un análisis de presas reveló que los peces y los crustáceos son los componentes principales de la dieta, lo que sugiere una suerte de especialización. Estos hallazgos se alinean con las preferencias de presa documentadas para el género *Thunnus*, incluyendo el atún aleta amarilla (*T. albacares*). Estas presas ostentan una posición alta en términos de frecuencia de ocurrencia (Baque-Monoscal *et al.*, 2012; Battaglia *et al.*, 2013; Logan *et al.*, 2015; Zudaire *et al.*, 2015; Navarro *et al.*, 2017).

La mayoría de las presas provenían de hábitats epipelágicos (*S. aurita*, *Mugil* sp. y larvas de crustáceos). Se evidenció la importancia de los peces pelágicos pequeños, pues los restos de Teleostei fueron encontrados en la mayoría de los estómagos y aportaron en gran medida a la dieta de los organismos estudiados. En las dos temporadas climáticas de estudio, no se evidenciaron diferencias en la composición y diversidad de los organismos consumidos, lo que sugiere que es necesario continuar realizando este tipo de investigaciones e incrementando los esfuerzos de muestreo para poder visualizar el comportamiento dietético para mayores escalas de tiempo y estructuras de talla. La composición de la dieta también puede ser explicada por preferencias diferentes debido a la ontogenia, *i.e.*, depende de

The niche breadth showed that the tuna species have a generalist feeding behavior ( $B_i = 0.998$ ). They feed proportionally from different types of prey. This behavior was found in both males ( $B_i = 0.996$ ) and females ( $B_i = 0.995$ ). The trophic niche breadth indices for the bonito ( $B_i = 0.993$ ) and the albacore ( $B_i = 0.997$ ) are high, which classifies them as generalist predators. In addition, the value of the Morisita-Horn index ( $C\lambda = 0.5$ ) does not show a high trophic overlap between the two species of tuna, which means that these predators are not feeding exactly on the same prey in the pelagic ecosystem.

## DISCUSSION

There is limited research on the feeding habits of *E. alletteratus* and *T. alalunga*. Few works have focused on the changes in their diet in relation to climatic seasons. In general, tuna species such as bonito and albacore are opportunistic predators that consume a wide variety of prey (Varghese *et al.*, 2014). This study is the first comparison of the diet composition between these two species in the Colombian Caribbean, which was based on characterizing the prey found in their stomach contents and on data regarding abundance, diet, feeding niche, and diet changes. A prey analysis revealed fish and crustaceans as the main diet components, suggesting some specialization. These findings are in line with the documented prey preferences of the genus *Thunnus*, including yellowfin tuna (*T. albacares*). These prey items rank high in frequency of occurrence (Baque-Monoscal *et al.*, 2012; Battaglia *et al.*, 2013; Logan *et al.*, 2015; Zudaire *et al.*, 2015; Navarro *et al.*, 2017).

Most of the prey mainly stemmed from epipelagic habitats (*S. aurita*, *Mugil* sp., and crustacean larvae). The importance of small pelagic fish was evidenced, since Teleostei remains were found in most stomachs and contributed greatly to the diet of the studied organisms. In the two climatic seasons analyzed, no differences in the composition and diversity of the organisms consumed were evidenced, suggesting that it is necessary to continue conducting this type of research and increasing sampling efforts to be able to visualize dietary behavior for larger time scales and size structures. The diet composition can also be explained by different preferences due to ontogeny, *i.e.*, it depends on the size structure, since juveniles and adults may have different energy requirements related to growth, nursery areas, and spawning migrations (Doncel and Páramo, 2010).

la estructura de talla, pues los juveniles y los adultos pueden tener diferentes requerimientos energéticos relacionados con el crecimiento, las áreas de cría y las migraciones de desove (Doncel y Páramo, 2010).

La dieta de *E. alletteratus* estuvo principalmente representada por *S. aurita* (43 %) y restos de Teleostei (27 %), según se ha registrado previamente para el Caribe colombiano, con sardinas como *Jenkinsia lamprotaenia* y *S. aurita* como presas principales (García y Posada, 2013). Los hábitos alimentarios de *E. alletteratus* en la zona costera de Santa Marta fueron bajos en términos de riqueza de elementos alimentarios. Se han obtenido resultados similares para esta especie en el Caribe colombiano, registrando 9 – 15 ítems alimentarios, donde los peces han sido el elemento más importante y representativo en el contenido estomacal con respecto al peso (Moreno, 1986; García y Posada, 2013). Otros estudios han encontrado un espectro trófico más amplio (n = 59) en *E. alletteratus* en el mar Mediterráneo, donde los peces son la presa más representativa en términos de peso. Se encontraron algunas preferencias alimentarias que dependen de las clases de tamaño de *E. alletteratus*, i.e., larvas megalopa y peces del género *Sardinella* en tamaños entre 20 y 40 cm.

Los restos de Teleostei y los peces del género *Sardinella* fueron la presa más importante según el IIR de *E. alletteratus*. En el Caribe colombiano, peces como *Decapterus* sp., *Harengula* sp., *J. lamprotaenia* y *S. aurita* han sido registrados como presas principales en términos de porcentaje gravimétrico (Moreno, 1986; García y Posada, 2013). Por otro lado, en el Pacífico mexicano se ha estudiado la dieta de *E. lineatus*, donde la presa más importante es *Opisthonema medirastre* y especies de Stomatopoda, de acuerdo con el IIR (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). Este resultado demuestra la importancia de las especies epipelágicas en la dieta de estos organismos. La presencia de restos de Teleostei brinda algunas perspectivas sobre las preferencias de las especies estudiadas. Teleostei probablemente contribuye a la fisiología de los peces en términos de energía (Varela *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2021).

57 % de la dieta de *T. alalunga* estuvo representada por larvas megalopa y 10 % por restos de Teleostei, de manera similar a estudios que registran presas como crustáceos. Sin embargo, el elemento alimentario principal fue el calamar (Young *et al.*, 2010). Los hábitos alimentarios de la albacora en la zona costera de Santa Marta fueron bajos en términos de la riqueza de ítems alimentarios. No hay información sobre sus hábitos alimentarios para el Caribe colombiano.

The diet of *E. alletteratus* was represented mainly by *S. aurita* (43 %) and Teleostei remains (27 %), as previously reported for the Colombian Caribbean, recording species such as *Jenkinsia lamprotaenia* and *S. aurita*, representatives of the family Clupeidae family, as the main prey (García and Posada, 2013). The feeding habits of *E. alletteratus* in the Santa Marta coastal area were low in terms of richness of food items. Similar results have been obtained for this species in the Colombian Caribbean, recording 9 – 15 food items, where fish has been the most important and representative element of stomach content in terms of weight (Moreno, 1986; García and Posada, 2013). Other studies have found a wider trophic spectrum (n = 59) in *E. alletteratus* in the central Mediterranean Sea, with fish being the most representative prey in terms of weight. Some feeding preferences were found which depend on the size classes of *E. alletteratus*, i.e., megalopa larvae and fish of the genus *Sardinella* in sizes of 20 – 40 cm.

Teleostei remains and fish of the genus *Sardinella* were the most important prey according to the RII of *E. alletteratus*. In the Colombian Caribbean, fish such as *Decapterus* sp., *Harengula* sp., *J. lamprotaenia*, and *S. aurita* have been recorded as the main prey in terms of gravimetric percentage (Moreno, 1986; García and Posada, 2013). On the other hand, in the Mexican Pacific, the diet of *E. lineatus* has been studied, with the most important prey being *Opisthonema medirastre* and Stomatopoda species according to the RII (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). This result demonstrates the importance of epipelagic species in the diet of these organisms. The presence of Teleostei remains provides some insights on the studied species' preferences. Teleostei likely contributes to the physiology of the fish in terms of energy (Varela *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2021).

57 % of the diet of *T. alalunga* was represented by Megalopa larvae, and 10 % by Teleostei remains, similarly to works reporting prey such as crustaceans. Nevertheless, the main food item was squid (Young *et al.*, 2010). The feeding habits of the albacore in the Santa Marta coastal area were low in terms of richness of food items. There is no information on its feeding habits for the Colombian Caribbean. This research is the first approach to the trophic ecology of this tuna. Worldwide, this type of research on this species is scarce. In general, it has been shown that fish are the main and most diverse prey in its stomach content (Aloncle and Delaporte, 1973; Ortiz De Zarate, 1987); between 32 and 44 food items have been recorded in *T. alalunga*, out of which nine were fish species, with the

Esta investigación es la primera aproximación a la ecología trófica de este atún. A nivel mundial, este tipo de investigación en esta especie es escaso. En general, se ha mostrado que los peces son la presa principal y más diversa en su contenido estomacal (Aloncle y Delaporte, 1973; Ortiz De Zarate, 1987); entre 32 y 44 elementos alimentarios han sido registrados en *T. alalunga*, de los cuales nueve eran especies de peces, donde la presa más importante fue *Engraulis japonicus* en términos de peso.

Se encontraron algunas preferencias alimentarias para las diferentes clases de tamaño de *T. alalunga*. Esta especie mostró la misma preferencia por larvas megalopa en tamaños de entre 30 y 60 cm. Las larvas fueron la presa más representativa en términos de abundancia. También se ha registrado la presencia de larvas de crustáceos, como en este estudio. Estos fueron la presa más numerosa (26 %) en el contenido estomacal de *T. albacares* (Potier *et al.*, 2007). Los peces son la presa principal en la mayoría de estudios sobre atún y otras especies pelágicas grandes, pues suministran un mayor enriquecimiento nutricional (Potier *et al.*, 2007; Consoli *et al.*, 2008). Es necesario resaltar la importancia de las larvas de invertebrados en la dieta de estos atunes; se encuentran con frecuencia y en gran abundancia, si bien su aporte energético es menor en comparación con otros organismos como peces o Cephalopoda. Este estudio registró larvas de crustáceos, como megalopas y Decapoda, así como de la familia Penaeidae y el filo Brachiopoda. Estas larvas han sido registradas en otros estudios sobre la ecología trófica de la albacora y otros atunes, siendo la presa más importante en el contenido estomacal en algunos casos (Potier *et al.*, 2007; Consoli *et al.*, 2008; Varela *et al.*, 2017).

*Engraulis japonicus* ha sido registrada como la presa principal de la albacora, así como el cefalópodo *Gonatopsis borealis*, según su IIR (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). La dieta de los atunes mostró diferencias significativas a lo largo del periodo de estudio, y su composición y diversidad de presas fueron bajas. No hubo evidencia de superposición trófica entre las dos especies, lo que probablemente se deba que estas especies se alimentan principalmente de peces, pero también de otras presas como las larvas megalopa y de Stomatopoda.

Los bajos índices de Levin y Shannon-Wiener indican una limitada amplitud de nicho trófico y una baja diversidad de presas. La presa dominante y más frecuente en el contenido estomacal de estos atunes sugieren una preferencia, probablemente porque brindan un porcentaje más alto de energía a su dieta. Aun así, su estrategia alimentaria se relaciona con la abundancia de presas en el ecosistema y

most important prey being *Engraulis japonicus* in terms of weight.

Some feeding preferences were found for the different size classes of *T. alalunga*. This species showed the same preference for megalopa larvae in sizes between 30 and 60 cm. Megalopa larvae were the most representative prey in terms of abundance. The presence of crustacean larvae has also been reported, as in this study. These were the most numerous prey (25.9 %) in the stomach content of *T. albacares* (Potier *et al.*, 2007). Fish are the main prey in most studies on tuna and other large pelagic species, as they provide greater nutritional enrichment (Potier *et al.*, 2007; Consoli *et al.*, 2008). It is necessary to highlight the importance of invertebrate larvae in the diet of these tunas; they are frequently found in great abundance, although their energy contribution is lower when compared to other organisms such as fish or Cephalopoda. This study reported crustacean larvae, such as those of Megalopa and Decapoda, as well as larvae of the family Penaeidae and the phylum Brachiopoda. These larvae have been reported in other studies on the trophic ecology of the albacore and other tunas, in some cases being the most important prey found in stomach contents (Potier *et al.*, 2007; Consoli *et al.*, 2008; Varela *et al.*, 2017).

*Engraulis japonicus* has been reported as the main prey of the albacore, as well as the cephalopod *Gonatopsis borealis*, according to its RII (Ruiz-Pérez *et al.*, 2016). The diet of the tunas showed significant differences over the studied period, and its prey composition and diversity was low. There was no evidence of trophic overlap between the two species, which is probably due to the fact that these species feed mainly on fish, but also on other prey such as megalopa and Stomatopoda larvae.

The low Levin and Shannon-Wiener indices indicate a limited trophic niche breadth and a low prey diversity. The dominant and most frequent prey in the stomach contents of these tuna suggest a preference, probably because they provide a higher percentage of energy to their diet. Still, the feeding strategy of the tunas is related to the abundance of prey in their ecosystem and their ability to select the most profitable prey (Consoli *et al.*, 2008). In this research, prey abundance and availability in the ecosystem was not studied. Based on our results and other previous studies, the tunas' preference for fish was evidenced (García and Posada, 2013).

con su habilidad para seleccionar la presa más provechosa (Consoli *et al.*, 2008). En esta investigación no se estudió la abundancia y la disponibilidad de presas en el ecosistema. Con base en nuestros resultados y en otros estudios previos, se evidenció la preferencia de los atunes por los peces (García y Posada, 2013).

## CONCLUSIONES

Se evidenció la importancia de los peces pelágicos pequeños, pues se encontraron restos de Teleostei en la mayoría de los estómagos, y estos contribuyeron en gran medida a la dieta de los organismos estudiados. En las temporadas climáticas analizadas, se encontraron diferencias significativas respecto a las abundancias de presas en el contenido estomacal. Finalmente, la mayoría de las presas provenían más que todo de hábitats epipelágicos (*S. aurita*, *Mugil* sp. y larvas de crustáceos). A pesar de esto *E. alletteratus* y *T. alalunga* fueron clasificados como depredadores generalistas y con baja diversidad de presas. Por lo tanto, se sugiere realizar investigaciones de ecología trófica que empleen enfoques combinados de contenido estomacal y análisis de isótopos estables para determinar el comportamiento trófico de estos organismos con mayor precisión.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a MinCiencias y a la Universidad del Magdalena por su apoyo financiero, técnico y logístico a través del proyecto *Pesca recreativa marina como alternativa para el desarrollo del turismo ecológico y socioeconómico en Santa Marta*, con código 074 – 2017. Este trabajo fue parte de la tesis de maestría en ciencias de SGR. La información oceanográfica y las imágenes satelitales fueron preparadas en el proyecto de investigación *Cambios a largo plazo de la biomasa, la productividad y el dominio de la comunidad fitoplanctónica en el sistema de afloramiento del Caribe colombiano*, en el marco de la convocatoria 2018 de Fonciencias.

## CONCLUSIONS

The importance of small pelagic fish was evidenced, as Teleostei remains were found in most stomachs and contributed greatly to the diet of the studied organisms. In the climatic seasons analyzed, significant differences were evidenced regarding prey abundance in stomach contents. Finally, most of the tuna prey stemmed mainly from epipelagic habitats (*Sardinella aurita*, *Mugil* sp., and crustacean larvae). Despite this, *E. alletteratus* and *T. alalunga* were classified as generalist predators and with low prey diversity. Therefore, it is advisable to conduct trophic ecology research while following combined stomach content approaches and stable isotope analyses in order to more accurately determine the trophic behavior of these organisms.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank MinCiencias and Universidad del Magdalena for their financial, technical, and logistic support, which was provided through the project titled *Marine recreational fishing as alternative for the development of ecological and socioeconomic tourism in Santa Marta*, with code 074 – 2017. This work was part of the MSc thesis of Santiago González-Rojas. The oceanographic information and satellite images were prepared during the research project titled Long-term changes in biomass, productivity and dominance of the phytoplankton community in the Colombian Caribbean upwelling system, within the framework of Fonciencias 2018.





## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Aloncle, H. and F. Delaporte. 1973. Rythmes alimentaires et circadiens chez le germon *Thunnus alalunga* dans le Nord-Est atlantique. Science Naturelles. Paris VI. 96 p.
- Báez, J., D. Macías, S. García-Barcelona, F. Poisson, E. Torreblanca, J. Bellido and J. Camiñas. 2021. Marine megafauna and charismatic vertebrate species. In Alboran Sea. Ecosyst. Mar. Res.. 41 p.
- Baque-Menoscal, J., D. Páez-Rosas y M. Wolff. 2012. Hábitos alimentarios de dos peces pelágicos *Thunnus albacares* y *Acanthocybium solandri* de la Reserva Marina de Galápagos. Rev. Biol. Mar. Oceanogr., 47(1): 1-11. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572012000100001>
- Battaglia, P., F. Andaloro, P. Consoli, V. Esposito, D. Malara, S. Musolino and T. Romeo. 2013. Feeding habits of the Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus* (L.1758), in the central Mediterranean Sea (Strait of Messina). Helgoland Mar. Res., 67(1): 97-107. <http://doi.org/10.1007/s10152-012-0307-2>
- Bertrand, A. Bard, F. and E. Josse. 2002. Tuna food habits related to the micronekton distribution in French Polynesia. Mar. Biol., 140(5), 1023-1037. <https://dx.doi.org/10.1007/s00227-001-0776-3>
- Bizzarro J., H. Robinson, C. Rinewal and D. Ebert. 2007. Comparative feeding ecology of four sympatric skate species off central California, USA. Environ. Biol. Fishes, 80:197-220. <http://dx.doi.org/10.1007/s10641-007-9241-6>
- Cervigón, F. 1992. Los peces marinos de Venezuela. Vol 1. Segunda edición. Fund. Cient. Los Roques, Caracas. 425 p.
- Chirichigno, N. y J. Vélez. 1998. Clave para identificar los peces marinos del Perú. Callao, Perú. Inst. Mar Perú. 496 p.
- Clothier, C. 1950. A key to some southern California fishes based on vertebral characters. Fish Bull., 85 p.
- Colwell, R., A. Chao, N. Gotelli, S. Lin, C. Mao, R. Chazdon and J. Longino. 2012. Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. J. Plant col., 5(1), 3-21. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr044>
- Consoli, P., T. Romeo, P. Battaglia, L. Castriota, V. Esposito, and F. Andaloro. 2008. Feeding habits of the albacore tuna *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) from central Mediterranean Sea. Mar. Biol., 155(1), 113-120. <https://doi.org/10.1007/s00227-008-1012-1>
- Doncel, O. y J. Paramo. 2010. Hábitos alimenticios del pargo rayado, *Lutjanus synagris* (Perciformes: Lutjanidae), en la zona norte del Caribe colombiano. Latin Am. J. Aq. Res., 38(3): 413-426. <https://doi.org/10.3856/vol38-issue3-fulltext-6>
- Ferry L., S. Clark and G. Cailliet. 1997. Food habits of spotted sand bass *Paralabrax maculatofasciatus* (Serranidae) from Bahía de Los Angeles, Baja California. Bull. South. CA Acad. Sci., 96:1-21. <https://scholar.oxy.edu/scas/vol96/iss1/1>
- Fischer, W., F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K. Carpenter and V. Niem. 1995. Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca: Pacífico centro-oriental. FAO, Roma. 573 p.
- Franco-Herrera, A. 2005. Oceanografía de la ensenada de Gaira. El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. Bogotá. 22 p.
- Hyslop, J. 1980. Stomach contents analysis. A review of methods and their application. J. Fish Biol., 17: 411-429.
- García, C. and C. Posada. 2013. Diet and feeding ecology of the little tunny, *Euthynnus alletteratus* (Pisces: Scombridae) in the central Colombian Caribbean: changes in 18 years. Latin Am. J. Aq. Res., 41(3): 588-594. <https://dx.doi.org/10.3856/vol41-issue3-fulltext-21>.
- Klett-Traulsen, A., G. Ponce and S. Ortega. 1996. Pesquería deportivo-recreativa. En: Casas-Valdez, M. y G. Ponce (Eds). Estudio del potencial pesquero y acuícola de Baja California Sur. México. 350 p.
- Krebs, C. 1999. Ecological methodology. Benjamin Cummings, Menlo Park, California, 620 p.
- Lasso, C. A., C.R. Heinsohn, S. Jensen and M.A. Morales-Betancourt. 2019. La pesca deportiva continental en Colombia: guía de las especies de agua dulce. Serie Ed. Rec. Hidrobiol. Pesq. Contin. Col.Inst. Invest. Rec. Biol. Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C.. 298 p.
- Lloret, J., N. Zaragoza, D. Caballero and V. Riera. 2008. Biological and socioeconomic implications of recreational boat fishing for the management of fishery resources in the marine reserve of Cap de Creus (NW Mediterranean). Fish. Res., 91(2-3): 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.12.002>
- Logan, J.M., W. Golet and M. Lutcavage. 2015. Diet and condition of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Gulf of Maine, 2004–2008. Environ. Biol. Fish., 98(5), 1411-1430. <https://doi.org/10.1007/s10641-014-0368-y>
- Manning, R. 1969. Stomatopod Crustacea of the western Atlantic. Florida. 387 p.
- Martínez-Juárez, L. F., J.J. Schmitter-Soto, N. Cabanillas-Terán, y N. Mercado-Silva. 2023. Diet variability of snappers (Teleostei: Lutjanidae) in a bay-to-reef ecosystem of the Mexican Caribbean. Wat. Biol. Sec., 100211.
- Méndez, M. 1981. Claves de identificación y distribución de los langostinos y camarones (Crustacea: Decapoda) del mar y ríos de la costa del Perú. Inst. Mar Perú. 170 p.
- Moreno, R. 1986. Ecología trófica de algunas especies de la familia Scombridae (Pisces) capturadas en aguas costeras del departamento del Magdalena, Caribe colombiano. Tesis Biol. Univ. Nal. Col., Bogotá. 105 p.

- Navarro, J., R. Sáez-Liante, M. Albo-Puigserver, M. Coll and I. Palomera. 2017. Feeding strategies and ecological roles of three predatory pelagic fish in the western Mediterranean Sea. Deep Sea Res. Part II: Topical Stud. Oceanogr., 140: 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.06.009>
- Ortiz de Zarate, V. 1987. Datos sobre la alimentación del atún blanco (*Thunnus alalunga*) juvenil capturado en el Golfo de Bizcaya. ICCAT Coll Vol Sci Pap, 26, 243-247.
- Paramo, J., L. Guillot-Illidge, S. Benavides, A. Rodríguez and C. Sánchez. 2009. Aspectos poblacionales y ecológicos de peces demersales de la zona norte del Caribe colombiano en relación con el hábitat: una herramienta para identificar Áreas Marinas Protegidas (AMPs) para el manejo pesquero. Caldasia, 31(1):123-144. <https://aquadoocs.org/handle/1834/8296>.
- Paramo, J., M. Wolff and U. Saint-Paul. 2012. Deep-sea fish assemblages in the Colombian Caribbean Sea. Fish. Res., 125: 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.011>
- Paramo, J., J. Cusba, J. Linero, S. Núñez, S. Quiroga, A. Sanjuan, A. Franco, S. González-Rojas, C. Linero, M. Pedrozo, D. Galvis, L. García, D. Marín, y S. Salas. 2019. La pesca deportiva marina como alternativa de desarrollo de turismo ecológico y socioeconómico en el Departamento del Magdalena, Caribe colombiano. 18 p.
- Pinkas, L., M. Oliphant and L. Iverson. 1971. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in California water. Fish. Bull., 152: 105.
- Posada, C. 2017. Ecología trófica de *Elagatis bipinnulata* Quoy y Gaimard, 1825 (Pisces: Carangidae) y *Euthynnus alletteratus* Rafinesque, 1810 (Pisces: Scombridae) en la región de Taganga y Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano. Trabajo Grado, Bogotá. 146 p.
- Potier, M., F. Marsac, Y. Chereil, V. Lucas, R. Sabatié, O. Maury and F. Ménard. 2007. Forage fauna in the diet of three large pelagic fishes (lancetfish, swordfish and yellowfin tuna) in the western equatorial Indian Ocean. Fish. Res., 83(1), 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.08.020>
- Romero, J., P. Catry, M. Hermida, V. Neves, B. Cavaleiro, L. Gouveia, and J. Granadeiro. 2021. Tunas off northwest Africa: The epipelagic diet of the bigeye and skipjack tunas. Fish. Res., 238, 105914. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.105914>
- Ruiz-Pérez, N., G. Cerdaneres-Ladrón de Guevara, D. López-Herrera e I. Altamirano-Ramírez. 2016. Relaciones tróficas entre cinco especies de peces pelágicos que cohabitan en las costas de Oaxaca, México. Hidrobiológica, 26(1): 77-85.
- Varela, J., I. Carrera and A. Medina. 2020. Seasonal feeding patterns of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Strait of Gibraltar. Mar. Environ. Res., 153, 104811. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104811>.
- Varghese, S., V. Somvanshi, M. John and R. Dalvi. 2013. Diet and consumption rates of common dolphinfish, *Coryphaena hippurus*, in the eastern Arabian Sea. J. App. Ichthyol., 29(5): 1022-1029. <http://doi.org/10.1111/jai.12166>
- Vieira, J., P. Costa, A. Braga, R. São-Clemente, C. Ferreira and J. Silva. 2021. Age, growth, and maturity of little tunny, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810) in southeastern Brazil. Latin Am. J. Aq. Res., 49(5): 773-787. <http://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2689>.
- Villareal, H., M. Álvarez, S. Córdoba, F. Escobar, G. Fagua, F. Gast y A. Umaña. 2004. Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Inst. Invest. Rec. Biol. Alexander von Humboldt. Bogotá. 236 p.
- Young J., M. Lansdell, R. Campbell, S. Cooper, F. Juanes and M. Guest. 2010. Feeding ecology and niche segregation in oceanic top predators off eastern Australia. Mar. Biol., 157(11): 2347-2368.

**RECIBIDO / RECEIVED:** 15/01/2023

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 14/02/2024



# Capacidad regenerativa post-cosecha de la macroalga roja *Chondracanthus chamissoi* en dos sistemas de cultivo en la costa centro-sur del Perú

## Post-harvest regenerative capacity of the red macroalgae *Chondracanthus chamissoi* in two culture systems in the south-central coast of Peru

Willian Ruiz-Ipanaque<sup>1,2</sup>, Paul Baltazar-Guerrero<sup>1,2\*</sup>, Max Castañeda-Franco<sup>2</sup> y Arturo Mires-Reyes<sup>2</sup>

0000-0003-4071-4772

0000-0003-2470-6879

0000-0001-9550-8912

1. Carrera de Biología Marina, Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima 15067, Perú.

2. Grupo de Investigación en Acuicultura Sostenible (GIAS); Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Licma),

Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación, Universidad Científica del Sur, Lima 15067, Perú. [pbaltazar@cientifica.edu.pe](mailto:pbaltazar@cientifica.edu.pe)\*

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

### RESUMEN

Ante la reducción de praderas naturales de *Chondracanthus chamissoi* en Perú se han planteado diferentes alternativas para su cultivo, principalmente optando por sistemas de cultivo suspendido (CS) y cultivo de fondo (CF). Al alcanzar la talla comercial, los talos sufren podas para su comercialización, desconociéndose si disminuyen su tasa de crecimiento específica (TCE) y/o capacidad regenerativa. Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar la TCE en la capacidad regenerativa post-cosecha y la dominancia de fases del ciclo de vida de *C. chamissoi* en dos eventos de poda comparando CS y CF entre agosto de 2019 y febrero de 2020 en la costa centro-sur del Perú. La TCE fue mayor en CS (1.67 % día<sup>-1</sup>) respecto de CF (1.47 % día<sup>-1</sup>). Asimismo, CS mostró mejores resultados en biomasa (631.6 ± 81.3 gm<sup>-1</sup>) y longitud (23.91 ± 5.8 cm) en comparación a CF (256.5 ± 33.6 gm<sup>-1</sup> y 21.10 ± 7.50 cm) tras la primera poda. Luego de la segunda poda, se observaron valores reducidos en biomasa (CS: 160.2 ± 180 gm<sup>-1</sup>, CF: 59.4 ± 110 gm<sup>-1</sup>) y longitud (CS: 16.23 ± 3.68 cm, CF: 15.73 ± 4.25 cm). Se determinó a la fase vegetativa como dominante, seguida de talos carpospóricos y finalmente los tetraspóricos. Se concluye que CS muestra mejores TCE luego de eventos poda y se recomienda dejar en promedio 4-5 cm de talo para facilitar una rápida regeneración.

**PALABRAS CLAVE:** Capacidad regenerativa, *Chondracanthus chamissoi*, plántula, tasa de crecimiento, poda.

### ABSTRACT

Due to the reduction of *Chondracanthus chamissoi* natural beds in Peru, different alternatives have been proposed for its cultivation, generally opting for suspended (CS) and bottom (CF) cultivation systems. When thalli reach commercial size, they get harvested for sale, and it is unknown if their specific growth rate (TCE) and/or regenerative capacity decrease. Therefore, the present work aimed to determine the TCE in the post-harvest regenerative capacity and the life cycle phase dominance of *C. chamissoi* in two pruning events comparing CS and CF during August 2019 and February 2020 in the south-central coast of Peru. The TCE was higher in CS (1.67 % day<sup>-1</sup>) in comparison to CF (1.47 % day<sup>-1</sup>). Likewise, CS showed better results in biomass (631.6 ± 81.3 gm<sup>-1</sup>) and length (23.91 ± 5.8 cm) compared to CF (256.5 ± 33.6 gm<sup>-1</sup> and 21.10 ± 7.50 cm) during the first harvest. After the second harvest, lower values in biomass (CS: 160.2 ± 180 gm<sup>-1</sup>, CF: 59.4 ± 110 gm<sup>-1</sup>) and length (CS: 16.23 ± 3.68 cm, CF: 15.73 ± 4.25 cm) were observed. The dominant phase was the vegetative one, followed by the carposporic and tetrasporic phases. In conclusion, suspended cultivation showed better results; it is recommended to leave an average of 4-5 cm during pruning, to allow a better growth for a new harvest in less than 3 months.

**KEY WORDS:** Regenerative capacity, *Chondracanthus chamissoi*, seedling, growth rate, pruning.

## INTRODUCCIÓN

Las Rhodophyta albergan aproximadamente 7554 especies, siendo considerado uno de los phylum de macroalgas con el mayor número de especies y una gran diversidad de formas y tamaños (Mateo-Cid *et al.*, 2020; Guiry, 2024). Dentro de este grupo se encuentra *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützing 1843, conocida comúnmente en Perú como “yuyo”, “mococho” y en Chile como “chicorea de mar” (Riofrío, 2003; Macchiavello *et al.*, 2012; Vidal y O’Ryan, 2015); se encuentra en zonas rocosas del intermareal y submareal con una distribución que abarca la costa occidental de Sudamérica, desde Paita-Perú (5°S) hasta Ancud-Chile (42°S) (Ramírez y Santelices, 1991; Icochea, 2008), aunque también ha sido registrada en las costas de Corea, Japón y Francia (Yang *et al.*, 2015). Presenta un talo membranáceo de 6 a 45 cm de altura, coloraciones diversas que van desde un verde-oscuro a un marrón-rojizo o negro, con un talo multiaxial aplanado y con ramificaciones dísticas, originando ejes primarios laminares con ramificaciones laterales las cuales presentan pinnulas planas o cilíndricas (Acleto, 1988; Arakaki *et al.*, 2018). *Chondracanthus chamissoi* exhibe un ciclo de vida isomórfico y trifásico, con alternancia de gametofitos (masculinos y femeninos), carposporofitos o cistocárpicos (individuos femeninos fecundados) y tetrasporofitos (Calderón *et al.*, 2010, Ávila *et al.*, 2011).

Esta especie está sujeta a sobreexplotación de sus poblaciones naturales (Carbajal *et al.*, 2005; Pariona y Gil-Kodaka, 2011) debido a su uso como alimento humano directo y por su contenido de carragenano (Acleto, 1986; Bulboa *et al.*, 2013; Saavedra *et al.*, 2019; Ávila-Peltroche y Padilla-Vallejos, 2020). Para 2006–2007 se ha registrado un aumento de la extracción del recurso en las praderas naturales del alga en las localidades Puerto Nuevo (de 35.6 a 89.9 g/m<sup>2</sup>) y playa Lobería (de 36.5 a 88.3 g/m<sup>2</sup>), ambos lugares pertenecientes a la provincia de Pisco (Perú); sin embargo, para 2010 se registró una disminución en la recolección de la biomasa promedio en ambas localidades (Flores *et al.*, 2015). La actual demanda de mercado de la especie no se puede colmar con la disponibilidad actual del recurso en poblaciones silvestres (Flores *et al.*, 2015). Por ende, el cultivo de *C. chamissoi* en Sudamérica se ha desarrollado en Chile y Perú. En Chile la principal metodología de cultivo es suspendido empleando frondas a través de la propagación vegetativa y el esporocultivo o inóculo de juveniles a partir de esporas (Macchiavello *et al.*, 2003, 2007; Bulboa *et al.*, 2005; Bulboa, 2006; Bulboa

## INTRODUCTION

Rhodophyta harbors approximately 7554 species and is regarded as one of the macroalgae phyla with the largest number of species, boasting a diversity of shapes and sizes (Mateo-Cid *et al.*, 2020; Guiry, 2024). Within this group is *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützing 1843, commonly known in Peru as *yuyo* and *mococho*, and in Chile as the *sea chicorea* (Riofrío, 2003; Macchiavello *et al.*, 2012; Vidal and O’Ryan, 2015). It is found in rocky areas of the intertidal and subtidal zones, with a distribution that spans the western coast of South America, from Paita-Perú (5°S) to Ancud-Chile (42°S) (Ramírez and Santelices, 1991; Icochea, 2008), although it has also been recorded in the coasts of Korea, Japan, and France (Yang *et al.*, 2015). This species features a membranous thallus ranging from 6 to 45 cm in height, with varying colors from dark green to reddish-brown or black. It has a flattened multiaxial thallus with distichous branching, producing primary lamellar axes with lateral branches that display either flat or cylindrical pinnules (Acleto, 1988; Arakaki *et al.*, 2018). *Chondracanthus chamissoi* has an isomorphic and three-phase lifecycle, with alternating gametophytes (male and female), carposporophytes or cystocarpics (fertilized female individuals), and tetrasporophytes (Calderón *et al.*, 2010, Ávila *et al.*, 2011).

This species has been subject to the overexploitation of its natural populations (Carbajal *et al.*, 2005; Pariona and Gil-Kodaka, 2011), given its use for direct human consumption and its carrageenan content (Acleto, 1986; Bulboa *et al.*, 2013; Saavedra *et al.*, 2019; Ávila-Peltroche and Padilla-Vallejos, 2020). As of 2006–2007, an increased extraction of this resource had been recorded in the algae’s natural meadows in the areas of Puerto Nuevo (35.6–89.9 g/m<sup>2</sup>) and Lobería (36.5–88.3 g/m<sup>2</sup>), both in the Pisco province of Peru. However, in 2010, a decrease in the collection of the average biomass of both localities was recorded (Flores *et al.*, 2015). The current market demand for the species cannot be met with the current availability of the resource in natural populations (Flores *et al.*, 2015). Therefore, the cultivation of *C. chamissoi* has been carried out in Chile and Peru. In Chile, suspended cultures are the main farming method, using fronds through vegetative propagation and spore culture or the inoculation of juveniles from spores (Macchiavello *et al.*, 2003, 2007; Bulboa *et al.*, 2005; Bulboa, 2006; Bulboa and Macchiavello, 2006; Cahui, 2018; Sáez and Macchiavello, 2018; Basaure *et al.*, 2020), managing to incorporate these cultures into an integrated

y Macchiavello, 2006; Cahui, 2018; Sáez y Macchiavello, 2018; Basaure *et al.*, 2020) logrando incorporar este cultivo en una Acuicultura Multitrófica Integrada (Koste, 2017). En Perú se han realizado estudios sobre técnicas de propagación vegetativa en diferentes sustratos (Pariona y Gil-Kodaka, 2011), cultivo vía esporas (Arbaiza, 2016; Castañeda *et al.*, 2017; Arbaiza *et al.*, 2019) y la evaluación de algunos factores involucrados en tasa de crecimiento (Riofrío, 2003); sin embargo, estudios relacionados a la capacidad regenerativa del alga son escasos (Acleto, 1986).

La regeneración involucra todo un proceso de recuperación de la zona afectada (producto de una necrosis) a partir del área cercana (células), debido a que la pérdida del material citoplasmático de las células dañadas crea una capa mucilaginosa sobre la zona afectada. Entonces, al cortar las frondas las algas tienen la capacidad de repararla, siendo, esa capacidad, dependiente de la especie y extensión del daño, involucrando dos etapas: restauración del área dañada y restablecimiento del crecimiento (Tornbom y Olivera, 1992; Buschmann *et al.*, 1999; Ram *et al.*, 2000). Múltiples estudios han determinado la importancia de la regeneración de las algas en el cultivo (Gómez y Westermeier, 1991; Echegaray y Seoane, 1992; Santelices y Varela, 1995; Correa *et al.*, 1999; Scrosati, 1999; Sáez *et al.*, 2015), caracterizado principalmente por la presencia del meristema apical e intercalar difuso (Candia *et al.*, 2006). Especies como *Sargassum muticum*, *Gracilaria verrucosa*, *Iridaea laminaroides*, *Cystoseira mediterranea*, *Gracilariopsis heteroclada*, *Hizikia fusiformis* y *Kappaphycus alvarezii* han mostrado respuesta al proceso regenerativo (Fletcher y Fletcher, 1975; Kling y Bodard, 1987; Gómez y Westermeier, 1991; Echegaray y Seoane, 1992; Kyoung *et al.*, 1999; Hurtado-Ponce, 2002; Hurtado y Biter, 2007; Yong *et al.*, 2014). Para el caso de *Laminaria hyperborea* parece tener un papel importante la presencia de florotaninos (Halm *et al.*, 2011). Sin embargo, para *C. chamosoi* la evaluación de su tasa regenerativa no se ha determinado en Perú, desconociendo el rendimiento de la cosecha por tipo de sistema de cultivo, factor fundamental para conocer la productividad y rendimiento real del cultivo mejorando la planificación y eficiencia de la producción. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar la capacidad regenerativa del alga *C. chamosoi* en dos sistemas de cultivo: suspendido y de fondo, en la costa centro-sur del Perú entre agosto 2019 y febrero 2020.

multi-trophic aquaculture (Koste, 2017). In Peru, studies have been conducted on vegetative propagation in different substrates (Pariona and Gil-Kodaka, 2011), spore-based cultivation (Arbaiza, 2016; Castañeda *et al.*, 2017; Arbaiza *et al.*, 2019), and the assessment of some factors involved in the growth rate (Riofrío, 2003). However, studies on the algae's regenerative capacity are scarce (Acleto, 1986).

Regeneration involves a whole recovery process in the affected area (as a result of a necrosis) from nearby areas (cells), given that the damaged cells' loss of cytoplasmic material creates a mucilaginous layer over the affected zone. Thus, when the fronds are cut, the algae can repair them. This ability depends on the species and the extent of the damage and comprises two stages: the restoration of the damaged area and the re-establishment of growth (Tornbom and Olivera, 1992; Buschmann *et al.*, 1999; Ram *et al.*, 2000). Multiple studies have determined the importance of algae regeneration in farming (Gómez and Westermeier, 1991; Echegaray and Seoane, 1992; Santelices and Varela, 1995; Correa *et al.*, 1999; Scrosati, 1999; Sáez *et al.*, 2015), mainly characterized by the presence of diffuse apical and intercalary meristems (Candia *et al.*, 2006). Species such as *Sargassum muticum*, *Gracilaria verrucosa*, *Iridaea laminaroides*, *Cystoseira mediterranea*, *Gracilariopsis heteroclada*, *Hizikia fusiformis*, and *Kappaphycus alvarezii* have shown a response to the regeneration process (Fletcher and Fletcher, 1975; Kling and Bodard, 1987; Gómez and Westermeier, 1991; Echegaray and Seoane, 1992; Kyoung *et al.*, 1999; Hurtado-Ponce, 2002; Hurtado and Biter, 2007; Yong *et al.*, 2014). In the case of *Laminaria hyperborea*, the presence of phlorotannins seems to play an important role (Halm *et al.*, 2011). Nevertheless, the regeneration rate of *C. chamosoi* in Peru has not been determined, and the culture yields for each farming system are not known, which is a fundamental factor for knowing the productivity and real performance of cultures in order to improve planning and production efficiency. Therefore, the objective of this work was to determine the regenerative capacity of the algae *C. chamosoi* in two cultivation systems (suspended and bottom) in the central-southern coast of Peru between August 2019 and February 2020.

## MATERIALES Y MÉTODOS

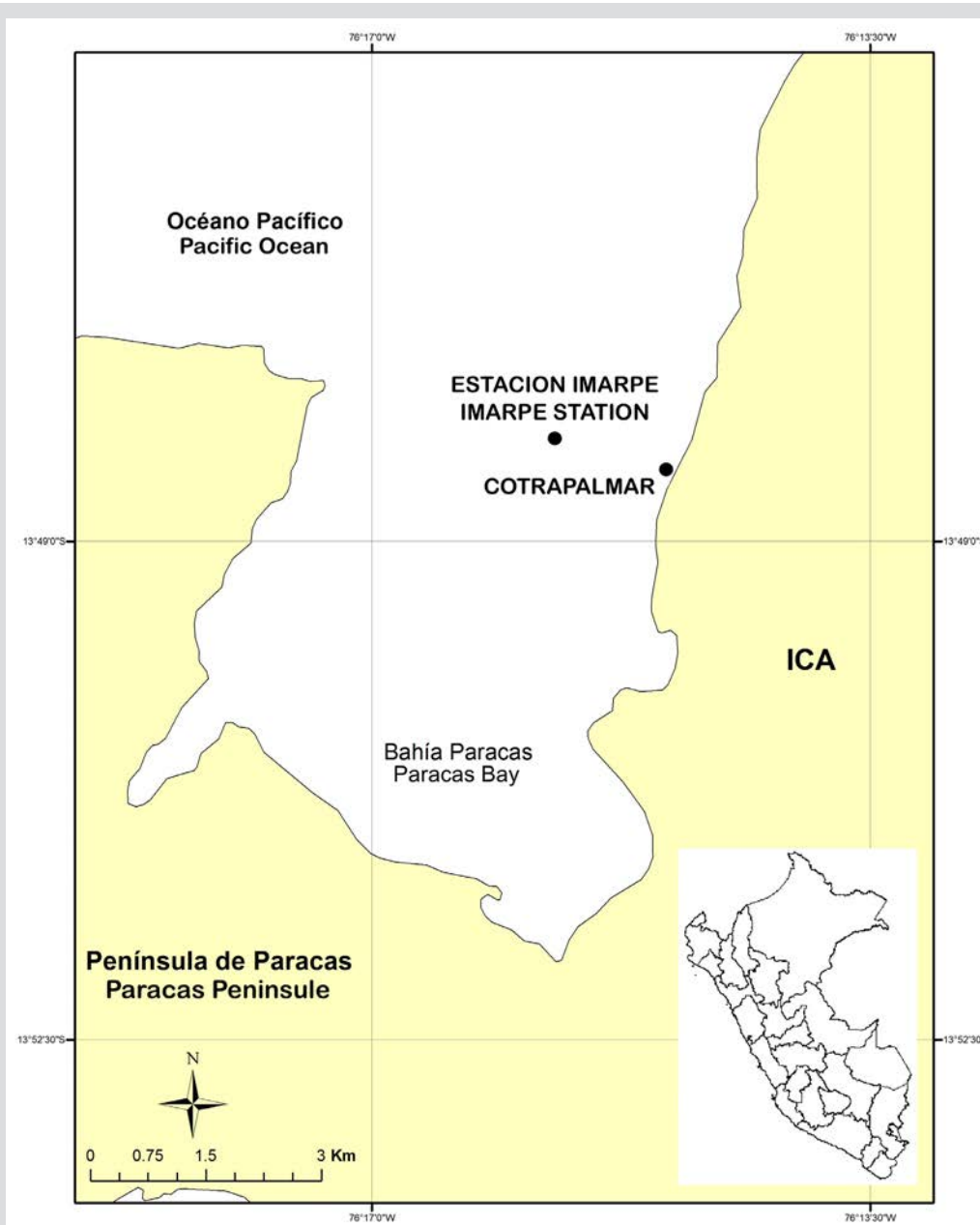
### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la concesión marina de la Cooperativa de Trabajadores Pesqueros Artesanales Algas Marinas (Cotrapalmar), ubicada en La Puntilla ( $13^{\circ} 48' S$ ,  $76^{\circ} 15' W$ ), al norte de la bahía de Paracas en el distrito homónimo, en la provincia de Pisco, departamento de Ica

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

This study was conducted in the marine concession of the Algas Marinas Artisanal Fishery Workers Cooperative (Cotrapalmar), located in La Puntilla ( $13^{\circ} 48' S$ ,  $76^{\circ} 15' W$ ), north of Paracas bay, in the district of the same name, in the province of Pisco, department of Ica (Figure 1). The



**Figura 1.** Ubicación de la Concesión Marina de la Cooperativa de Trabajadores Pesqueros Artesanales Algas Marinas (Cotrapalmar), La Puntilla, San Andrés, Pisco-Perú. Los puntos indican la ubicación de la concesión marina y la estación de toma de parámetros fisicoquímicos del Instituto del Mar del Perú (Imarpe).

**Figure 1.** Location of the marine concession belonging to the Algas Marinas Artisanal Fishery Workers Cooperative (Cotrapalmar), La Puntilla, San Andrés, Pisco-Peru. The dots indicate the location of the marine concession and the physicochemical parameters sampling station of the Peruvian Institute of the Sea (Imarpe).

(Figura 1). La concesión se encuentra a 200 m de la línea de costa con una profundidad máxima de 4 m y un área total de 5 ha. El estudio se ejecutó durante 2019-2020, concretamente desde agosto 2019 hasta febrero 2020.

### Variables fisicoquímicas

Las variables fisicoquímicas fueron tomadas de la estación de monitoreo del Instituto del Mar del Perú ( $13^{\circ} 48' 33''$  S– $76^{\circ} 15' 45''$  W) la cual se encuentra muy cercana al área de estudio. Las variables tomadas para el presente estudio fueron temperatura y salinidad.

### Obtención de Unidades de Cultivo

Las cuerdas de polipropileno inoculadas con individuos de *C. chamissoi*, consideradas como unidades muestrales (UM), fueron otorgadas por parte del Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (Licma) de la Universidad Científica del Sur como resultado de la técnica por cultivo vía esporas. Las cuerdas fueron sembradas en la concesión marina de Cotrapalmar en enero 2019 y su periodo de crecimiento en mar fue de 8 meses previo a la primera poda (agosto 2019).

### Sistemas de cultivo

La generación de sistemas de cultivo consistió en anclar las UM a mangas hechas con malla de pesca  $0.20 \times 1.20$  m colmadas de cantos rodados. Para el sistema de Cultivo Suspendido (CS) (Figura 2A) se instalaron tres sistemas suspendidos a modo de réplicas, cada una con tres UM ( $n = 9$ ), separadas cada 0.3 m, cubiertas de talos de *C. chamissoi* de 4 a 5 cm de largo, e instaladas entre 2 y 4 m de profundidad. Las UM fueron mantenidas verticalmente con ayuda de una boya, sujeta al extremo superior de cada cuerda (Figura 2A).

Para el sistema de Cultivo en Fondo (CF) (Figura 2B) también se instalaron tres sistemas a modo de réplicas a una profundidad de 4 m con tres UM cada una ( $n = 9$ ), cubiertas de talos de *C. chamissoi* de 4-5 cm de largo. En cada réplica las cuerdas fueron atadas por sus dos extremos a las mangas, con una separación de 0.3 m entre cada cuerda, manteniéndose en posición horizontal y a 0.15 m por encima del fondo marino. A cada réplica se ató una boya demarcatoria desde la superficie (Figura 2B). Previo al inicio del estudio, los sistemas fueron instalados y monitoreados por 15 días con cuerdas sin inóculos, para corroborar su estabilidad en el fondo marino.

concession is 200 m away from the coastline and has a maximum depth of 4 m, as well as a total area of 5 ha. This study was conducted during the 2019-2020 period, specifically between August 2019 and February 2020.

### Physicochemical variables

The physicochemical variables were taken from the monitoring station of the Peruvian Institute of the Sea ( $13^{\circ} 48' 33''$  S– $76^{\circ} 15' 45''$  W), which is very close to the study area. The variables measured for this study were temperature and salinity.

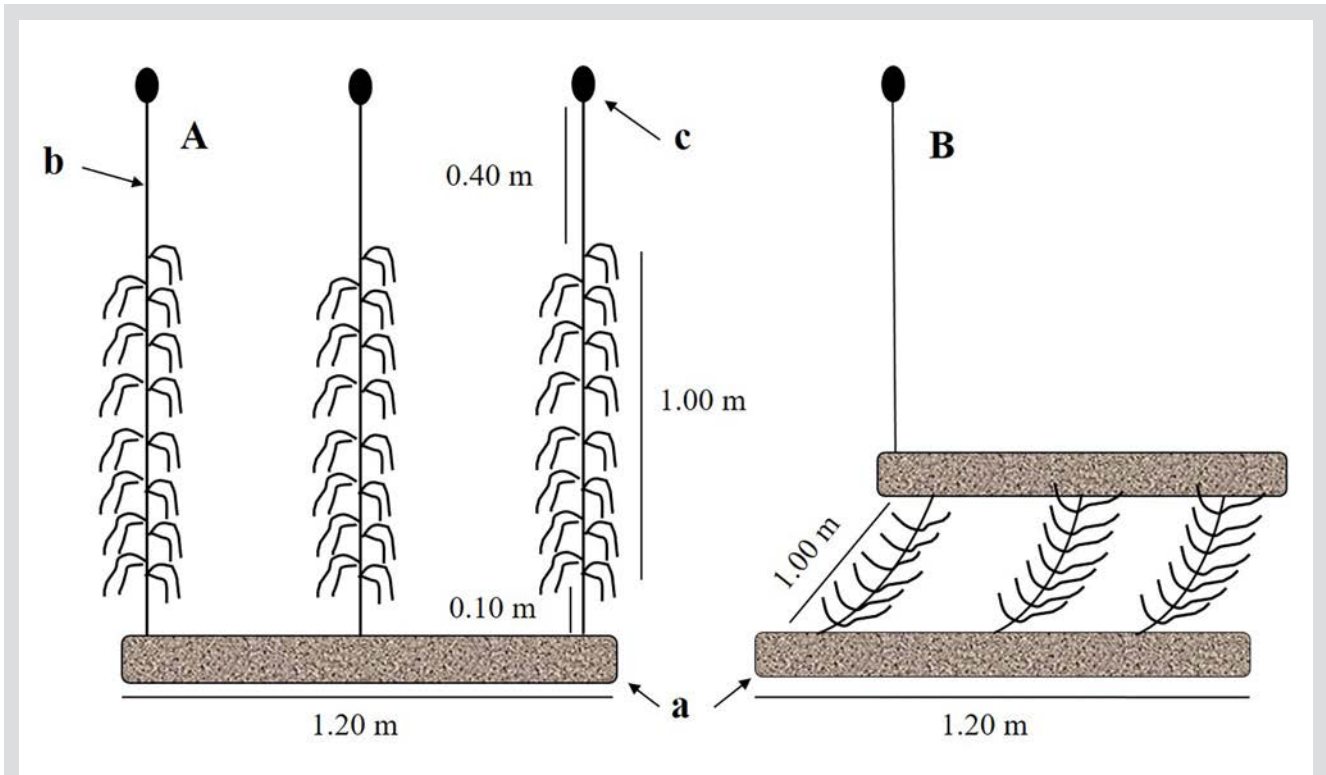
### Obtaining cultivation units

The polypropylene strings inoculated with *C. chamissoi* individuals, regarded as sample units (SUs), were provided by the Marine Culture Research Laboratory (LICMA) of Universidad Científica del Sur, and they were the result of spore-based cultivation. The strings were sown in Cotrapalmar's marine concession in January 2019, and their sea growth period lasted eight months before the first pruning (August 2019).

### Cultivation systems

The creation of cultivation systems involved anchoring the SUs to sleeves made from fishing nets measuring  $0.20 \times 1.20$  m, filled with rounded stones. For the suspended cultivation system (SC) (Figure 2A), three suspended systems were installed as replicas, each one with three SUs ( $n = 9$ ), 0.3 m apart, covered with thalli of *C. chamissoi* 4-5 cm in length, and installed at 2-4 m deep. The SUs were vertically supported with the help of a buoy attached to the upper end of each string (Figure 2A).

For the bottom cultivation system (BC) (Figure 2B), three systems were also installed as replicas, at a depth of 4 m, with three SUs each ( $n = 9$ ), covered with thalli of *C. chamissoi* 4-5 cm in length. In each replica, the strings were tied at their two ends to the sleeves, with a separation of 0.3 m between strings. They were maintained in a horizontal position and at 0.15 above the sea floor. A demarcating buoy was tied to each replica from the surface (Figure 2B). Prior to the start of the study, the systems were installed and monitored for 15 using strings with no inocula, in order to confirm their stability on the sea floor.



**Figura 2.** Sistema de cultivo suspendido (A) y fondo (B) de *C. chamissoi*. a: manga rellena con piedras de cantera; b: cuerda cubierta de “yuyo” (UM); c: boya.

**Figure 2.** Suspended (A) and bottom (B) cultivation systems for *C. chamissoi*. a: Sleeve filled with quarry stones; b: string covered with yuyo (SU); c: buoy.

## Evaluación de la capacidad regenerativa

### Colecta y traslado

La toma de muestra se realizó mediante buceo semiautónomo y en forma aleatoria cortando manualmente los ejes y ramas principales de las plantas, procurando no extraer el disco basal, según indica Acleto (1986); y extrayendo todos los ejemplares de mayor longitud en la cuerda (‘metro lineal’). Posteriormente se marcaron las UM para su seguimiento, evaluando un total de 18 UM/mes.

Se realizó una poda inicial a las UM (agosto de 2019, invierno) para propiciar su primera regeneración. Luego de ello se realizaron dos post-cosechas (podas) en noviembre de 2019 (primavera) y febrero de 2020 (verano) podando o extrayendo solo los ejes y ramas principales, dejando en promedio 4-5 cm de longitud de *C. chamissoi*. La biomasa colectada de cada UM fue puesta en bolsas ziploc rotuladas, separadas por sistema de cultivo, y llevadas al Licma en un contenedor térmico a una temperatura no inferior a 10 °C para su caracterización.

## Evaluation of regenerative capacity

### Collection and transport

Sampling was carried out via semi-autonomous diving and randomly, manually cutting the main axes and branches of the plants, taking care not to remove the basal disk, as indicated by Acleto (1986), and extracting all specimens longer than the string (‘linear meter’). Then, the SUs were marked for monitoring. We evaluated a total of 18 SUs per month.

An initial pruning of the SUs was carried out (August 2019, winter) to favor their first regeneration. Afterwards, two post-harvest prunings were performed in November 2019 (spring) and February 2020 (summer), cutting or extracting only the axes and main branches, leaving a 4-5 cm length of *C. chamissoi* on average. The biomass collected from each SU was placed in labeled Ziploc bags, which were separated by cultivation system and taken to the LICMA in a thermal container at a temperature no lower than 10 °C for characterization.



## Pretratamiento

En el Licma las muestras fueron lavadas con agua de mar, extrayendo al máximo cualquier resto e impureza que pudiera afectar el registro de la biomasa húmeda. Así mismo se realizó la separación macroscópica por fase del ciclo de vida mediante la diferenciación de frondas tales como plantas cistocárpica = C, tetraspórica = T y fronda vegetativa = V (Acleto, 1986; Bulboa y Macchiavello, 2006).

## Toma de variables biométricas

Se realizaron monitoreos mensuales para la toma de datos de crecimiento *in-situ*, registrando la longitud (cm) de todos los individuos podados y, paralelamente, se realizó el mantenimiento de estos (limpieza de epibiontes y sedimentos). Posterior a la poda (cada tres meses), se registró la longitud (cm) con ayuda de un vernier y la biomasa (g), además de la biomasa acumulada ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ), con una balanza electrónica de 0.01 g de precisión en las instalaciones del Licma (*ex-situ*) considerando la fase del talo.

## Evaluación de la Tasa de Crecimiento Específico (TCE)

Utilizando datos de longitud, la capacidad regenerativa se expresó mediante el cálculo de la Tasa de Crecimiento Específico (TCE) tomando como referencia la ecuación propuesta por Orduña-Rojas y Robledo (1999):

$$TCE (\%) = \left( \ln \left( \frac{L_2}{L_1} \right) * t^{-1} \right) \times 100$$

Donde

$L_2$  = longitud final

$L_1$  = longitud inicial

t = tiempo.

## Análisis estadístico

Se hizo uso del programa estadístico RStudio. Los datos de longitud, biomasa, TCE y fase fueron analizados mediante las pruebas de normalidad (Test Jarque-Bera) y homocedasticidad (Test de Bartlett). Para el caso de datos de biomasa durante la primera cosecha se realizó la prueba T-Student y para longitud la prueba U de Mann-Whitney; para la segunda cosecha al no cumplirse con los supuestos de normalidad y homocedasticidad se realizó la prueba U Mann-Whitney. Para el análisis de la morfología de especímenes de *C. chamissoi* en base a los datos de longitud y biomasa, se realizó un ANOVA de dos vías para los datos con distribución normal; y prueba SRH para datos no paramétricos.

## Pretreatment

In the LICMA, the samples were washed with seawater, extracting any trace and impurity that could affect the measurement of the wet biomass. Likewise, macroscopic separation by lifecycle phases was performed by differentiating fronds such as cystocarpic (C), tetrasporic (T), and vegetative (V) plants (Acleto, 1986; Bulboa and Macchiavello, 2006).

## Biometric variables

Monthly monitoring was carried out for *in situ* growth data collection, recording the length (cm) of all pruned individuals while performing maintenance tasks (cleaning of epibionts and sediments). After pruning (every three months), the length (cm) was recorded with the help of a vernier, and the biomass (g), as well as the accumulated biomass, was measured using a digital balance with a 0.01 g accuracy. This was done in the facilities of LICMA (*ex situ*), considering the phase of the thallus.

## Evaluating the specific growth rate (SGR)

Using length data, the regenerative capacity was expressed by calculating the specific growth rate (SGR), taking the equation proposed by Orduña-Rojas and Robledo (1999) as reference:

$$SGR (\%) = \left( \ln \left( \frac{L_2}{L_1} \right) * t^{-1} \right) \times 100$$

Where:

$L_2$  = final length

$L_1$  = initial length

t = time

## Statistical analysis

The RStudio software was used. The length, biomass, SGR, and phase data were analyzed via normality (Jarque-Bera) and homoscedasticity (Bartlett) tests. For the biomass data, the T-Student test was carried out during the first harvest, and, for the length data, the Mann-Whitney U test was conducted. As for the second harvest, since the assumptions of normality and homoscedasticity were not fulfilled, the Mann-Whitney U test was performed. To analyze the morphology of *C. chamissoi* individuals based on length and biomass data, a two-way ANOVA was carried out for the data with a normal distribution, as well as an SRH test for non-parametric data.

## RESULTADOS

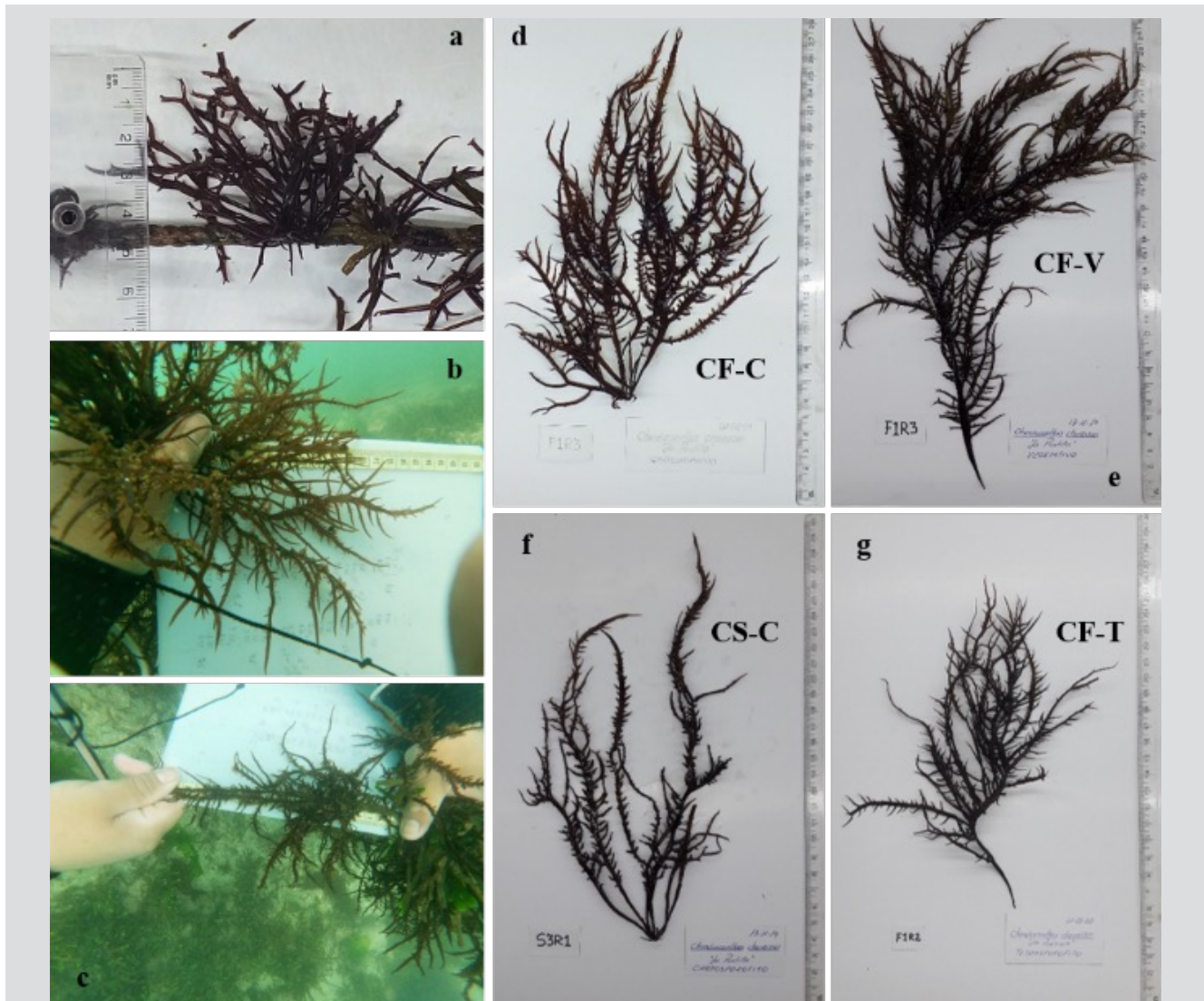
### Caracterización morfológica de los especímenes

La caracterización e identificación de la fase de desarrollo de las plantas de *C. chamissoi* fue a nivel macroscópico: a las frondas con ausencia de estructuras reproductivas se les denominó vegetativas (V); las frondas con presencia de cistocarpos se les denominó carpospóricas (C); y las frondas con presencia de soros tetrasporangiales fueron denominadas tetraspóricas (T). Las plantas carpospóricas y tetraspóricas mostraron un talo ancho/grueso, a diferencia de

## RESULTS

### Morphological characterization of the specimens

The characterization and identification of the development phase of the *C. chamissoi* plants was performed at the macroscopic level: the fronds with no reproductive structures were labeled as *vegetative* (V); those with the presence of cystocarps were labeled as *carposporic* (C); and those with the presence of tetrasporangial sori were labeled as *tetrasporic* (T). Carposporic and tetrasporic plants showed a wide/thick thallus, unlike the vegetative ones,



**Figura 3.** Proceso de monitoreo de *C. chamissoi*: **a:** talla al inicio del experimento tras la poda inicial (agosto 2019); **b:** medición durante el monitoreo 1 (setiembre 2019); **c:** medición durante el monitoreo 2 (octubre 2019); **d:** individuo proveniente de la poda inicial (agosto 2019); **e y f:** individuos provenientes de la post-cosecha 1 (noviembre 2019); **g:** individuo proveniente de la post-cosecha 2 (febrero 2020). \*CF: cultivo de fondo; CS: cultivo suspendido; C: fronda carpospórica; V: fronda vegetativa; T: fronda tetraspórica.

**Figure 3.** Monitoring process for *C. chamissoi*: **a:** size at the beginning of the experiment after the initial pruning (August 2019); **b:** measurement during monitoring 1 (September 2019); **c:** measurement during monitoring 2 (October 2019); **d:** individual from the initial pruning (August 2019); **e and f:** individuals from post-harvest 1 (November 2019); **g:** individual from post-harvest 2 (February 2020). \*CF: bottom cultivation, or BC; CS: suspended cultivation, or SC; C: carposporic frond; V: vegetative frond; T: tetrasporic frond.

los talos vegetativos; prevaleciendo la coloración marrón-verdoso. En su mayoría los especímenes presentaron talos multiaxiales, originando más de dos ejes principales con ramificaciones de diferente tamaño (Figura 3).

### Parámetros fisicoquímicos

Entre el inicio del experimento hasta la primera post-cosecha (invierno-primavera, agosto a noviembre 2019) la temperatura promedio fue de 17.5 °C y la salinidad promedio fue de 35.1. Hasta la segunda post-cosecha (primavera-verano, noviembre 2019 a febrero 2020), la temperatura promedio registrada fue de 20.5 °C, con una salinidad promedio de 34.7.

### Variables biométricas y Tasa de Crecimiento Específico (TCE)

#### Primera post-cosecha

La biomasa y longitud promedio inicial antes de la primera post-cosecha, fue de  $1.02 \pm 0.87$  g y  $4.68 \pm 1.01$  cm para CF respectivamente, mientras que para CS fue de  $1.50 \pm 0.67$  g y  $4.28 \pm 1.07$  cm sin encontrar diferencias significativas (biomasa:  $p = 0.09$ ; longitud:  $p = 0.35$ ). Se pudo observar en la primera post-cosecha para CS (primavera 2019), 103 días posteriores a la poda inicial, que *C. chamissoi* presentó una longitud promedio de  $23.91 \pm 5.78$  cm y una biomasa acumulada promedio de  $631.6 \pm 81.3$  g.m<sup>-1</sup> (N = 157), encontrándose diferencias significativas (longitud:  $p = 3e^{-5}$ ; biomasa:  $p = 0.003$ ) con respecto a CF en donde se obtuvo una longitud promedio de  $21.10 \pm 7.50$  cm y una biomasa acumulada promedio de  $256.5 \pm 33.6$  g m<sup>-1</sup> (N = 128, Figura 4) mientras que la TCE de la longitud resultó ser no significativa para ambos tratamientos ( $p = 0.13$ ).

with a prevalence of a brown-greenish coloration. Most specimens exhibited multiaxial thalli, producing more than two main axes with branches of different sizes (Figure 3).

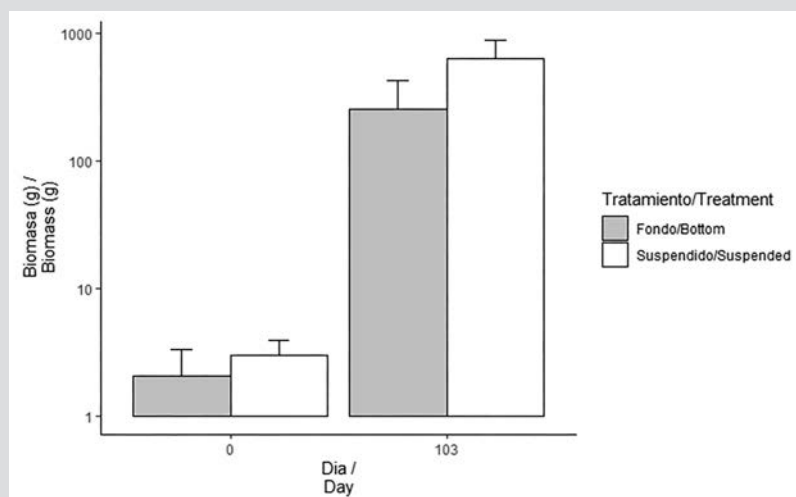
### Physicochemical parameters

Between the beginning of the experiment and the first post-harvest (winter-spring, August to November 2019), the average temperature was 17.5 °C, and the average salinity was 35.1. Until the second post-harvest (spring-summer, November 2019 to February 2020), the recorded average temperature was 20.5 °C, with an average salinity of 34.7.

### Biometric variables and specific growth rate (SGR)

#### First post-harvest

For BC, the initial biomass and length before the first post-harvest were  $1.02 \pm 0.87$  g and  $4.68 \pm 1.01$  cm, respectively, while, for SC, the reported values were  $1.50 \pm 0.67$  g and  $4.28 \pm 1.07$  cm, with no significant differences found (biomass:  $p = 0.09$ ; length:  $p = 0.35$ ). In the first SC post-harvest (spring 2019), 103 days after the initial pruning, it could be observed that *C. chamissoi* exhibited an average length of  $23.91 \pm 5.78$  cm and an average accumulated biomass of  $631.6 \pm 81.3$  g.m<sup>-1</sup> (N = 157), finding significant differences (length:  $p = 3e^{-5}$ ; biomass:  $p = 0.003$ ) with regard to BC, which reported an average length of  $21.10 \pm 7.50$  cm and an average accumulated biomass of  $256.5 \pm 33.6$  g m<sup>-1</sup> (N = 128, Figure 4). Meanwhile, the SGR of the length was not significant for both treatments ( $p = 0.13$ ).



**Figura 4.** Biomasa de *C. chamissoi* para el inicio y primera post-cosecha, después de 103 días de crecimiento ( $L_{10}$ -Logaritmo en base 10).

**Figure 4.** Biomass of *C. chamissoi* for the beginning of the experiment and the first post-harvest, after 103 days of growth ( $L_{10}$ -base 10 logarithm).

## Segunda post-cosecha

La longitud inicial para el desarrollo de la segunda post-cosecha fueron de  $5.44 \pm 0.65$  cm y  $5.63 \pm 0.75$  cm para CF y CS respectivamente. Luego de 102 días, se realizó la segunda post-cosecha durante el verano de 2020, cuando no se registraron diferencias significativas ( $p = 0.25$ ) entre los dos tipos de cultivos, aunque la longitud de fronda en CS fue levemente superior ( $16.23 \pm 3.68$  cm) a las de CF ( $15.73 \pm 4.25$  cm). Por otro lado, para el análisis de biomasa se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.046$ ) en los resultados finales para CS y CF obteniendo como biomasa promedio  $160.2 \pm 180$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$  y  $59.4 \pm 110$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ , respectivamente. Finalmente, al igual que la primera post-cosecha, los valores de TCE no mostraron diferencias significativas entre cultivos ( $p = 0.10$ ) (Tabla 1) (Figura 5).

**Tabla 1.** Longitud promedio (cm), biomasa acumulada promedio ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ) y TCE ( $\% \cdot \text{día}^{-1}$ ) en cultivo suspendido (CS) y cultivo de fondo (CF). La cosecha 1 se realizó 103 días después de la poda inicial, mientras que la cosecha 2 se realizó 102 días después de la primera cosecha. Tamaños muestrales: Cosecha 1: CS ( $n = 157$ ), CF ( $n = 128$ ); Cosecha 2: CS ( $n = 157$ ), CF ( $n = 93$ ).

Sistema de cultivo / Cultivation system	Longitud / Length (cm)		Biomasa acumulada / Accumulated biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ )		TCE ( $\% \cdot \text{día}^{-1}$ ) / SGR ( $\% \cdot \text{day}^{-1}$ )	
	Post-cosecha 1 / Post-harvest 1 (Nov 2019)	Post-cosecha 2 / Post-harvest 2 (Feb 2020)	Post-cosecha 1 / Post-harvest 1 (Nov 2019)	Post-cosecha 2 / Post-harvest 2 (Feb 2020)	Post-cosecha 1 / Post-harvest 1 (Nov 2019)	Post-cosecha 2 / Post-harvest 2 (Feb 2020)
CS / SC	$23.91 \pm 5.78$	$16.23 \pm 3.68$	$631.6 \pm 81.3$	$160.2 \pm 180$	1.67	1.06
CF / BC	$21.10 \pm 7.50$	$15.73 \pm 4.25$	$256.5 \pm 33.6$	$59.4 \pm 110$	1.47	1.02

## Proporción de fases reproductivas en los sistemas de cultivo

Al realizar la primera poda (agosto 2019) se observó la predominancia de frondas vegetativas (55.52 % para el CF y 50.20 % para el CS), seguido de frondas carpospóricas (CF = 34.55 %; CS = 38.44 %) y frondas tetraspóricas (CF = 9.93 %; CS = 11.36 %) (Tabla 2). La primera post-cosecha (noviembre 2019) para CF se encontró que predominan las frondas vegetativas, seguidas de las plantas carpospóricas y finalmente la plantas tetraspóricas; mientras que para CS se observa lo siguiente: fase carpospórica -> talos vegetativos -> fase tetraspórica. Para biomasa (ANOVA) y longitud (SHR y Comparaciones Múltiples) se encontraron diferencias significativas entre sistemas de cultivo (ANOVA:  $p = 0.001$ ; SHR:  $p = 0.01$ ) y ciclo de vida (ANOVA:  $p = 0.0006$ ; SHR:  $p = 0.02$ ) (Fig. 6A y 6B) (Tabla 2 y 3).

## Second post-harvest

The initial length for the second post-harvest were  $5.44 \pm 0.65$  cm and  $5.63 \pm 0.75$  cm for BC and SC, respectively. After 102 days, the second post-harvest was carried out (during the summer of 2020), and no significant differences between the two types of cultures were recorded ( $p = 0.25$ ), although the frond length in SC was slightly greater ( $16.23 \pm 3.68$  cm) than that of BC ( $15.73 \pm 4.25$  cm). On the other hand, in the biomass analysis, significant differences were found ( $p = 0.046$ ) in the final results for SC and BC, obtaining average biomass values of  $160.2 \pm 180$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$  and  $59.4 \pm 110$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ , respectively. Finally, like in the first post-harvest, the SGR showed no significant difference between cultures ( $p = 0.10$ ) (Table 1) (Figure 5).

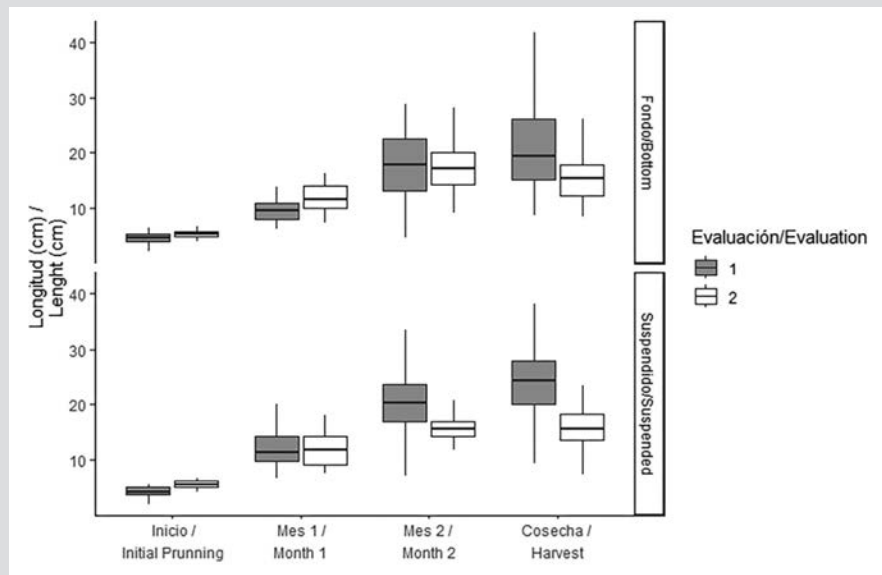
**Table 1.** Average length (cm), average accumulated biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ), and SGR ( $\% \cdot \text{day}^{-1}$ ) in suspended (SC) and bottom (BC) cultures. Post-harvest 1 was carried out 103 days after the initial pruning, while post-harvest 2 was conducted 102 days after the first harvest. Sample sizes: post-harvest 1: SC ( $n = 157$ ), BC ( $n = 128$ ); post-harvest 2: SC ( $n = 157$ ), BC ( $n = 93$ ).

## Proportion of reproductive phases in the cultivation systems

When the first pruning was carried out (August 2019), the predominance of vegetative fronds was observed (55.52 % for BC and 50.20 % for SC), followed by carposporic fronds (BC = 34.55 %; SC = 38.44 %) and tetrasporic fronds (BC = 9.93 %; SC = 11.36 %) (Table 2). The first post-harvest (November 2019) for BC showed a predominance of vegetative fronds, followed by carposporic plants and, finally, tetrasporic plants. Meanwhile, for SC, the following was observed: carposporic phase -> vegetative thalli -> tetrasporic phase. Regarding biomass (ANOVA) and length (SHR and Multiple Comparisons), significant differences between cultivation systems (ANOVA:  $p = 0.001$ ; SHR:  $p = 0.01$ ) and lifecycles (ANOVA:  $p = 0.0006$ ; SHR:  $p = 0.02$ ) were found (Fig. 6A and 6B) (Tables 2 and 3).

Durante la segunda cosecha (febrero 2020) en CF y CS se observa una tendencia similar, predominan las frondas vegetativas, seguidas de la fase carpospórica y tetraspórica. La prueba SRH y comparaciones múltiples efectuada para la biomasa encontró diferencias significativas (ANOVA:  $p = 0.03$ ; SHR:  $p = 0.01$ ) entre el tipo de sistema de cultivo ( $p = 0.03$ ), pero no para el ciclo de vida ( $p = 0.06$ ), mientras que el ANOVA de dos vías no encontró diferencias significativas para la longitud respecto al tipo de sistema de cultivo ( $p = 0.54$ ) ni para las fases de vida ( $p = 0.33$ ) (Figura 6C y 6D) (Tabla 2 y 3).

During the second harvest (February 2020), a similar trend was observed in BC and SC: there is a predominance of vegetative fronds, followed by the carposporic and tetrasporic phases. The SRH and Multiple Comparisons test performed for the biomass showed significant differences (ANOVA:  $p = 0.03$ ; SHR:  $p = 0.01$ ) between cultivation systems ( $p = 0.03$ ), but not between lifecycles ( $p = 0.06$ ). Meanwhile, the two-way ANOVA found no significant differences for length with respect to the cultivation system ( $p = 0.54$ ) or the lifecycle phases ( $p = 0.33$ ) (Figures 6C and 6D) (Table 2 and 3).



**Figura 5.** Longitud (cm) de *C. chamissoi* durante la primera y segunda cosecha. La evaluación 1 (cajas oscuras) corresponde al tiempo desde la poda inicial hasta la cosecha 1, mientras que la evaluación 2 (cajas blancas) corresponde al tiempo desde la cosecha 1 hasta la cosecha 2. El inicio corresponde a la poda inicial (evaluación 1, agosto 2019) y a la cosecha 1 (evaluación 2, noviembre 2019). Mes 1 y Mes 2 corresponden a los meses de monitoreo: septiembre y octubre 2019 para la evaluación 1; diciembre 2019 y enero 2020 para la evaluación 2.

**Figure 5.** Length (cm) of *C. chamissoi* during the first and second harvest. Evaluation 1 (dark boxes) corresponds to the time period from the initial pruning to harvest 1, while evaluation 2 (white boxes) corresponds to the time period between harvests 1 and 2. The start corresponds to the initial pruning (evaluation 1, August 2019) and harvest 1 (evaluation 2, November 2019). Month 1 and month 2 correspond to the months of monitoring: September and October 2019 for evaluation 1 and December 2019 and January 2020 for evaluation 2.

**Tabla 2.** Proporción por ciclo de vida de *C. chamissoi* calculada en base a la biomasa. V: fronda vegetativa; C: carposporofito; T: tetrasporofito.

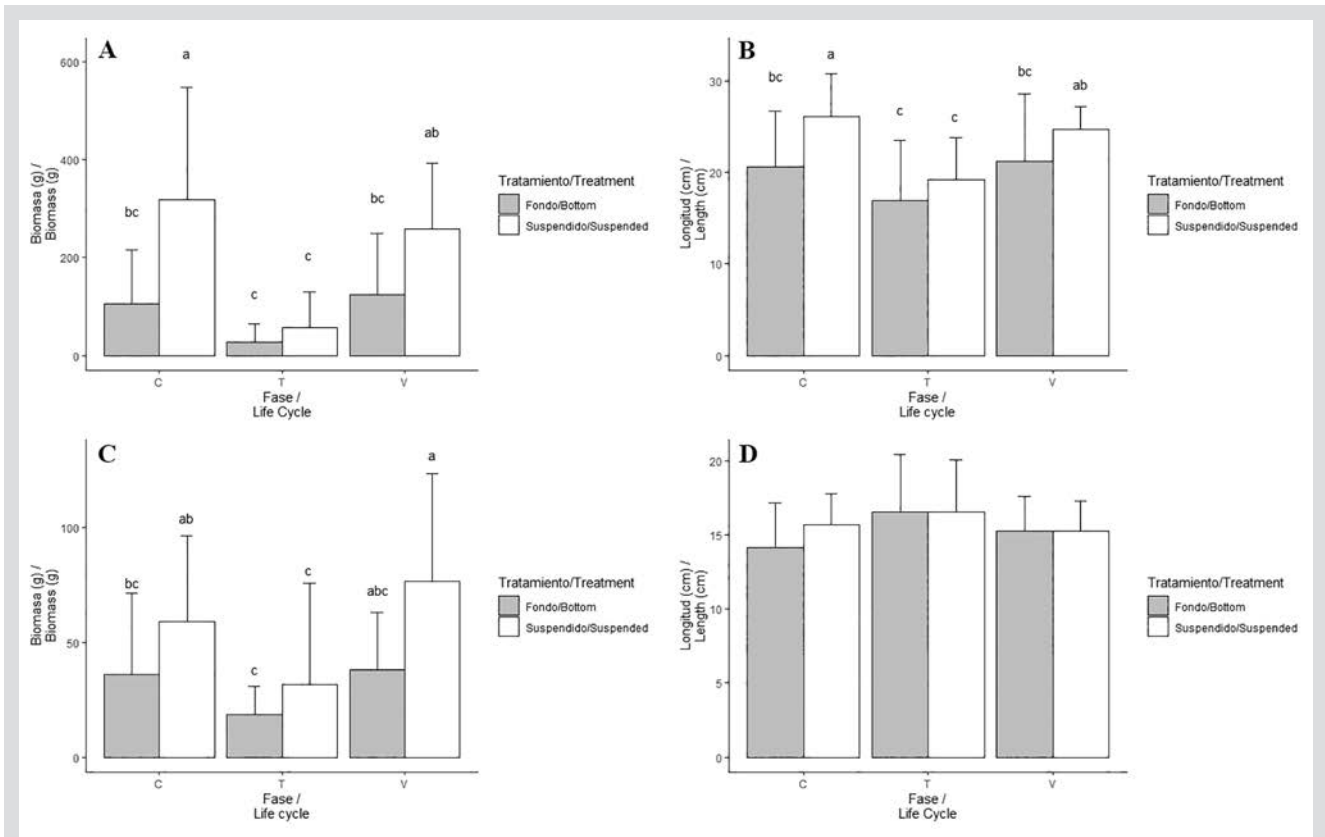
**Table 2.** Proportion for each lifecycle of *C. chamissoi*, calculated based on biomass. V: vegetative frond; C: carposporophyte; T: tetrasporophyte.

Tipo Sistema / System type	Ciclo de vida / Lifecycle	Inicio / Start (%)	Post-cosecha 1 / Post-harvest 1 (%)	Post-cosecha 2 / Post-harvest 2 (%)
Suspendido / Suspended	V	50.2	40.76	47.73
	C	38.4	50.26	36.87
	T	11.4	08.99	15.40
Fondo / Bottom	V	55.5	48.19	42.36
	C	34.6	41.00	40.54
	T	9.9	10.81	17.10

**Tabla 3.** Biomasa ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ) por ciclo de vida de *C. chamissoi*. V: frondas vegetativas; C: carposporofito; T: tetrasporofito.

**Table 3.** Biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ) for each lifecycle of *C. chamissoi*. V: vegetative fronds; C: carposporophyte; T: tetrasporophyte.

Sistema de Cultivo / Cultivation system	Ciclo de vida / Lifecycle	Biomasa / Biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ )		
		Poda inicial / Initial pruning	Cosecha 1 / Post harvest 1	Cosecha 2 / Post harvest 2
Suspendido / Suspended	V	80.62 ± 1.63	257.4 ± 72.9	76.5 ± 17.98
	C	61.73 ± 2.77	317.4 ± 110.2	59.1 ± 17.01
	T	18.24 ± 1.29	56.75 ± 23.4	24.7 ± 8.86
Fondo / Bottom	V	78.28 ± 2.79	123.6 ± 41.1	25.2 ± 11.48
	C	48.72 ± 2.88	105.2 ± 34.8	24.1 ± 5.87
	T	13.99 ± 1.07	27.74 ± 11.5	10.2 ± 2.89



**Figura 6.** Biomasa (g) y longitud (cm) del ciclo de vida de *C. chamissoi* durante la primera (A y B) y segunda (C y D) cosecha en CS y CF; C: carposporofito; T: tetrasporofito; V: fronda vegetativa.

**Figure 6.** Biomass (g) and length (cm) for the lifecycle of *C. chamissoi* during the first (A and B) and second (C and D) harvest in SC and BC; C: carposporophyte; T: tetrasporophyte; V: vegetative frond.

## DISCUSIÓN

Las UM tuvieron un monitoreo mensual hasta el tercer mes, cuando, para la primera post-cosecha, se registró una longitud promedio en el alga de  $21.10 \pm 7.50$  cm para CF y  $23.91 \pm 5.78$  cm para CS. Estos resultados son similares a los obtenidos por la empresa Acuisur S.A.C. en San Juan de Marcona (22.5 cm de longitud en promedio) pero en cinco meses de cultivo (Zapata, 2018). Por otra parte, Cahui (2018) registra crecimientos promedio de 17-18 cm durante 65 días en CS en la costa sur de Perú, valores similares a lo obtenido en la segunda cosecha en este trabajo (promedio  $16.23 \pm 3.68$  cm para CS en 3 meses).

Una de las ventajas que presentan las algas y que facilitan su cultivo es la ausencia de diferenciación de tejidos, lo cual facilita la propagación vegetativa; la maleabilidad de sus ciclos de reproducción y la variabilidad de su metabolismo (Machado, 2015). Para el caso de *C. chamissoi*, la ventaja es su rapidez en el proceso de cicatrización, el cual evita la infestación de contaminantes o patógenos que pueden retrasar la regeneración (Sáez *et al.*, 2015), y los tiempos de recuperación son dependiente de la extensión del daño (Mooney y Staden, 1985; Sáez *et al.*, 2015), la edad del alga y de la presencia de compuestos antioxidantes como los florotaninos (Halm *et al.*, 2011); recomendando el uso de ejemplares juveniles (Fletcher y Fletcher, 1975). Los ejemplares utilizados para el desarrollo del trabajo no tenían cosechas anteriores, lo cual favoreció su crecimiento. Para el caso de otras algas, como *Fucus* sp. la regeneración de ramas adventicias de la superficie de la herida es un proceso lento (Fulcher y McCully, 1969) y dependiente de la distancia al ápice vegetativo, resultando mejor realizar cortes cercanos al ápice. En el caso de *Agarophyton chilense* (ex *Gracilaria chilensis*), no se encontraron diferencias significativas entre las longitudes de fragmentos cortados con y sin puntas apicales durante sus procesos de regeneración (Santelices y Varela, 1995). Por otro lado, Correa *et al.* (1999) lograron mejorar el tiempo de regeneración de fragmentos (del centro y del borde del alga) de *Gigartina skottsbergii* con temperatura de 15 °C e irradiancia de  $5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , así como en hapterios cortados. Asimismo, en *Gracilariopsis lemaneiformis* la regeneración se realiza a partir de la rama principal, la cual crece formando ramas secundarias, las cuales en posteriores procesos de cortes pueden asumir la capacidad regenerativa de una rama principal (Zhou *et al.*, 2016). Por lo tanto, el mecanismo de regeneración es característico en cada especie de alga.

## DISCUSSION

The SUs underwent monthly monitoring until the third month. At this time, in the first post-harvest, an average algae length of  $21.10 \pm 7.50$  cm was recorded for BC, as well as  $23.91 \pm 5.78$  cm for SC. These results are similar to those obtained by the Acuisur S.A.C. company in San Juan de Marcona (average length of 22.5 cm), albeit after five months of cultivation (Zapata, 2018). On the other hand, Cahui (2018) recorded average growths of 17-18 cm after 65 days in SC in Peru's southern coast. These values are similar to those obtained in this work for the second harvest ( $16.23 \pm 3.68$  cm on average for SC in three months).

One of the advantages of algae which facilitate their cultivation is the lack of tissue differentiation, facilitating vegetative propagation, in addition to the malleability of their reproduction cycles and the variability of their metabolism (Machado, 2015). In the case of *C. chamissoi*, the advantage is its fast healing process, which prevents infestation by contaminants or pathogens that may delay regeneration (Sáez *et al.*, 2015). Moreover, its recovery times are dependent on the extent of the damage (Mooney and Staden, 1985; Sáez *et al.*, 2015), the age of the algae, and the presence of antioxidant compounds such as phlorotannins (Halm *et al.* 2011). Thus, the use of juvenile specimens is recommended (Fletcher and Fletcher, 1975). The specimens used in this work had seen no previous harvests, which favored their growth. In the case of other algae such as *Fucus* sp., the regeneration of adventitious branches on the surface of the wound is a slow process (Fulcher and McCully, 1969) that depends on the distance to the vegetative apex. Therefore, it is better to perform cuts near the apex. In the case of *Agarophyton chilense* (ex *Gracilaria chilensis*), no significant differences were found between the length of the fragments cut with or without apical tips during regeneration processes (Santelices and Varela, 1995). On the other hand, Correa *et al.* (1999) managed to improve the regeneration time of fragments (from the center and the edge of the algae) of *Gigartina skottsbergii*, with a temperature of 15 °C and an irradiance of  $5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , as well in cut hapteria. Likewise, in *Gracilariopsis lemaneiformis*, regeneration takes place from the main branch, which grows while forming secondary branches. These branches, after later cuts, may assume the regenerative capacity of a main branch (Zhou *et al.*, 2016). Therefore, each algae species has its own characteristic regeneration mechanism.

La pared celular de *C. chamissoi* está formada por dos capas: una interna maciza (esqueleto) y una externa (gelatinosa), ambos compuestos por polímeros de carbohidratos (Riofrío, 2003). Tal como lo menciona Acleto (1986), optar por una extracción o poda manual de los ejes o ramificaciones de mayor longitud, permite que los ejes más cortos puedan ser los encargados de mantener su crecimiento y/o propiciar su regeneración (Sáez *et al.*, 2015). Kling y Bodard (1987), indican que el proceso de regeneración en *Gracilaria verrucosa* depende de las células que se encuentran debajo de la zona afectada, siendo las células corticales (Collantes *et al.*, 2004) las encargadas de cumplir esta función. Fue sometida a poda cada tres meses y, tal como lo mencionan Gómez y Westermeier (1991), realizar podas intensivas no es recomendable, ya que el nivel energético del alga disminuye, siendo reflejado en procesos de cicatrización lentos y regeneración de frondas con tiempos cada vez más prolongados.

Los factores que afectan el proceso regenerativo son varios, desde el tipo de corte, el método de cosecha, los factores fisicoquímicos, la estacionalidad y el epifitismo, entre otros (Acleto, 1986; Gómez y Westermeier, 1991; Echegaray y Seoane, 1992; Lobban *et al.*, 1994; Correa *et al.*, 1999; Mantri *et al.*, 2011; Macchiavello *et al.*, 2017); ante ello se asume que la manipulación del hombre puede jugar un papel importante, ya que muchas veces una extracción intensa genera disminución de la biomasa en el área que a su vez afecta en la economía del extractor. La exposición del alga en zonas de baja profundidad y cercanas a la costa (Arbaiza *et al.*, 2019), afectó al desarrollo del trabajo disminuyendo la talla y biomasa en la post-cosecha 2 en ambos sistemas de cultivo.

El CS resultó ser mejor en el rendimiento en biomasa y longitud respecto de CF, con resultados similares a otras especies de algas rojas como *Kappaphycus alvarezii* y *Euclima denticulatum* (Kimathi *et al.*, 2018). Por otra parte, el mejor rendimiento en las cuerdas en CS también puede deberse a que estuvieron en contacto más cercano a la luz solar, lo cual favorece el crecimiento y desarrollo de *C. chamissoi* (Hurd *et al.*, 2014) gracias a su relación directa con los procesos de fotosíntesis, teniendo en consideración el fotoperiodo e irradiancia (Macchiavello *et al.*, 2017), demostrado en la mayor longitud y biomasa a menor profundidad en el presente estudio (Tabla 1). Así mismo, Bulboa y Macchiavello (2001) determinaron la relación directa que existe entre la tasa de crecimiento (TC) de *C. chamissoi* y el incremento de la temperatura, logrando la

The cell wall of *C. chamissoi* consists of two layers: an internal, solid layer and an external one (gelatinous). Both layers are composed of carbohydrate polymers (Riofrío, 2003). As mentioned by Acleto (1986), a manual extraction or pruning of the longest axes or branches allows the shorter axes to be responsible for maintaining growth and/or favor regeneration (Sáez *et al.*, 2015). Kling and Bodard (1987) indicate that the regeneration process of *Gracilaria verrucosa* depends on the cells below the affected area, with cortical cells (Collantes *et al.*, 2004) being responsible for fulfilling this function. The pruning to which this species was subjected took place every three months, and, as mentioned by Gómez and Westermeier (1991), performing few intensive prunings is not advisable, as the algae's energy level decreases, which translates into slow healing processes and increasingly prolonged frond regeneration times.

The factors affecting the regeneration process are diverse: from the type of cut to the harvesting method, physicochemical factors, seasonality, and epiphytism, among others (Acleto, 1986; Gómez and Westermeier, 1991; Echegaray and Seoane, 1992; Lobban *et al.*, 1994; Correa *et al.*, 1999; Mantri *et al.*, 2011; Macchiavello *et al.*, 2017). In light of this, it is assumed that human manipulation may play an important role, as an intense extraction often generates a biomass reduction in the area, which in turn affects the extractor's economy. The exposure of the algae to areas of low depth and close to the coast (Arbaiza *et al.*, 2019) affected our work by reducing the size and biomass in post-harvest 2 for both cultivation systems.

SC turned out to perform better than BC in terms of biomass and length, with results similar to those of other red algae species such as *Kappaphycus alvarezii* and *Euclima denticulatum* (Kimathi *et al.*, 2018). On the other hand, the better performance in the strings of SC may also be due to the fact that they were in closer contact with sunlight, which favors the growth and development of *C. chamissoi* (Hurd *et al.*, 2014) thanks to its direct relationship with photosynthesis processes, considering the photoperiod and the irradiance (Macchiavello *et al.*, 2017). This is demonstrated by the greater length and biomass occurring at lower depths in this study (Table 1). Likewise, Bulboa and Macchiavello (2001) determined the direct relationship between the growth rate (GR) of *C. chamissoi* and temperature increases, achieving the best GR (8-16 %/day) at a temperature of 25 °C. However, Pacheco-Ruiz *et al.* (2005) mentioned that fronds of *C. squarulosus* show rapid aging with increased temperature and irradiance.



mejor TC (8-16 %/día) a una temperatura de 25 °C. Sin embargo, Pacheco-Ruiz *et al.* (2005) hacen mención a que frondas de *C. squarulosus* muestran envejecimiento de forma rápida cuando la temperatura e irradiancia aumentan.

En otro estudio realizado por Macchiavello *et al.* (2003) se registra la producción de esporas en la especie durante todo el año, con un pico considerable en primavera y otro menor en verano. Ello se encuentra estrictamente relacionado al aumento en biomasa de la fase cistocárpica y luego en individuos vegetativos juveniles, muy similar a lo sucedido en el presente estudio, donde la ganancia de biomasa en la post-cosecha 1 (noviembre 2019, primavera) en CF y CS fue superior a lo obtenido en la post-cosecha 2 (febrero 2020, verano) (Tabla 3).

Trabajos realizados por la Universidad Católica del Norte con cuerdas provenientes de esporocultivo obtuvieron biomásas entre 217 a 300 g.m<sup>-1</sup> en intervalos de dos a cuatro meses a tres metros de profundidad, además, trabajos similares de cultivo vegetativo de *C. chamissoi* reportan resultados de 435 g.m<sup>-1</sup> en tres meses a tres metros de profundidad. Estos resultados son superiores a la cosecha 1 en CF (256 ± 33.6 g.m<sup>-1</sup>) pero inferiores a CS (631 ± 81.3 g.m<sup>-1</sup>), posiblemente relacionado a la cantidad de luz al que el CS es sometido al encontrarse a una menor profundidad (Saavedra *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONES

Se evidenció que *C. chamissoi* puede regenerarse y llegar a su talla de extracción en aproximadamente dos meses a través de podas manuales dejando en promedio 4-5 cm para propiciar su regeneración. Así mismo, los sistemas de cultivo suspendido (CS) presentan mejores rendimientos en biomasa y longitud. Sin embargo, la capacidad regenerativa disminuye con cada poda, por lo tanto se sugiere la siembra de nueva semilla luego de tres cosechas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico e Innovación (ProInnovate), Convenio N° 234-INNOVATEPERU-IAPIP-2017 “Desarrollo de un programa de producción de semilla y cultivo de *Chondracanthus chamissoi* ‘yuyo’ en la Bahía de Paracas, Pisco”, y la Universidad Científica del Sur (UCSUR N° 060-2022-PRO99).

Another study conducted by Macchiavello *et al.* (2003) records the production of spores in the species throughout the year, with a considerable peak in spring and a lower one in summer. This is strictly related to the increase in biomass in the cystocarpic phase and then in juvenile vegetative individuals, which is very similar to what occurred in this study, where the biomass gain of post-harvest 1 (November 2019, spring) was higher for BC and SC than that obtained in post-harvest 2 (February 2020, summer) (Table 3).

In works carried out by Universidad Católica del Norte with strings from spore culture, biomass values between 217 and 300 g.m<sup>-1</sup> were obtained in intervals of 2-4 months at 3 m deep. In addition, similar studies on the vegetative cultivation of *C. chamissoi* have reported results of 435 g.m<sup>-1</sup> in three months at depths of 3 m. These results are superior to those of harvest 1 in BC (256 ± 33.6 g.m<sup>-1</sup>) but inferior to those of SC (631 ± 81.3 g.m<sup>-1</sup>), which may be related to the amount of light to which SC is exposed, as it is at lower depths (Saavedra *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONS

It was evidenced that *C. chamissoi* can regenerate and reach its extraction size in approximately two months when manual pruning is performed, leaving 4-5 cm on average to facilitate regeneration. In addition, suspended cultivation systems exhibit a better performance in terms of biomass and length. Nevertheless, regenerative capacity decreases with each pruning, which is why sowing new seeds after three harvests is recommended.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded through the National Program for Technological Development and Innovation (ProInnovate), Agreement No. 234-INNOVATEPERU-IAPIP-2017, titled Development of a program for producing seeds and cultures of *Chondracanthus chamissoi*, ‘yuyo’, in Paracas bay, Pisco, and by Universidad Científica del Sur (UCSUR N° 060-2022-PRO99).

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Acleto, C. 1986. Algunos aspectos biológicos de *Gigartina chamissoi* (C. Ag) J. Agardh (Rhodophyta, Gigartinales). Rev. de Cien. UNMSM, 74: 38-47. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualdata/publicaciones/rev\\_ciencias/v74\\_n1/a04.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualdata/publicaciones/rev_ciencias/v74_n1/a04.pdf)
- Acleto, C. 1988. Aspectos fitogeográficos y taxonómicos de las algas marinas de Perú. Gayana Bot., 45: 143-146.
- Arakaki, N., P. Gil-Kodaka, P. Carbajal, A. Gamarra y M.E. Ramírez. 2018. I-Rhodophyta: 33-102. En: Macroalgas de la costa central del Perú. Univ. Nal. Agr. La Molina, Lima. 128 p.
- Arbaiza, S. 2016. Viabilidad reproductiva para el cultivo de *Chondracanthus chamissoi* proveniente de tres poblaciones del litoral peruano. Tesis MSc Acui., Univ. Nal. Agr. La Molina, Lima. 114 p. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2772>
- Arbaiza, S., P. Gil-Kodaka, N. Arakaki y K. Alveal. 2019. Primeros estadios de cultivo a partir de carposporas de *Chondracanthus chamissoi* de tres localidades de la costa peruana. Rev. Biol. Mar. Oceanogr., 54: 204-213. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1901>
- Ávila, M.; M. Piel, J. Caceres and K. Alveal. 2011. Cultivation of the red alga *Chondracanthus chamissoi*: Sexual reproduction and seedling production in culture under controlled conditions. J. Appl. Phycol., 23: 529-536. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9628-1>
- Ávila-Peltroche, J. and J. Padilla-Vallejos. 2020. The seaweed resources of Peru. Bot. Mar., 63(4): 381-394. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0026>
- Basaure, H., J. Macchiavello, C. Sepúlveda, F. Sáez, D. Yáñez, L. Vega and C. Martín. 2021. Sea bottom culture of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta: Gigastinales) by vegetative propagation at Puerto Aldea, Tongoy Bay (Northern Chile). Aquac. Res., 52(5): 2025-2035. <https://doi.org/10.1111/are.15051>
- Bulboa, C. R. 2006. Bases bio-tecnológicas para o cultivo de *Chondracanthus chamissoi*, uma alga vermelha de importância econômica da costa chilena. Tesis Doc. Bot., Univ. São Paulo, São Paulo. 122 p. <https://repositorio.usp.br/item/001526148>
- Bulboa, C. and J. Macchiavello. 2001. The effects of light and temperature on different phases of the life cycle in the carrageenan producing alga *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales). Bot. Mar., 44(4): 371-374. <https://doi.org/10.1515/BOT.2001.047>
- Bulboa, C. and J. Macchiavello. 2006. Cultivation of cystocarpic, tetrasporic and vegetative fronds of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) on ropes at two localities in northern Chile. Invest. Mar., 34(1): 109-112. <https://doi.org/10.4067/S0717-71782006000100010>
- Bulboa, C.R., J.E. Macchiavello, E.C. Oliveira and E. Fonck. 2005. First attempt to cultivate the carrageenan-producing seaweed *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützing (Rhodophyta; Gigartinales) in northern Chile. Aquac. Res., 36(11): 1069-1074. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01321.x>
- Bulboa, C., K. Véliz, F. Sáez, C. Sepúlveda, L. Vega and J. Macchiavello. 2013. A new method for cultivation of the carragenophyte and edible red seaweed *Chondracanthus chamissoi* based on secondary attachment disc: Development in outdoor tanks. Aquaculture, 410-411: 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.018>
- Buschmann, A.H., J. Correa, R. Westermeier, M. Hernández-González and R. Norambuena. 1999. Mariculture of red algae in Chile. J. World Aquacult. Soc., 30(2): 41-45.
- Cahui, J. 2018. Efecto del sustrato sobre el crecimiento de *Chondracanthus chamissoi* en cultivo en sistema suspendido en el litoral marino de Ilo. Tesis Ing. Pesq., Univ. Nal. Moquegua, Ilo. 65 p. <https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/87>
- Calderón, M., M.E. Ramírez y D. Bustamante. 2010. Notas sobre tres especies de Gigartinales (Rhodophyta) del litoral peruano. Rev. Per. Biol., 17(1): 115-121. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.59>
- Candia, A., F. Galleguillos, M. Núñez y G. Aroca. 2006. Avances en el mejoramiento productivo del cultivo del «pelillo». Inst. Fomento Pesq. (IFOP), Chile, 26 p. [https://www.researchgate.net/publication/280320103\\_Avances\\_en\\_el\\_mejoramiento\\_productivo\\_del\\_cultivo\\_del\\_pelillo](https://www.researchgate.net/publication/280320103_Avances_en_el_mejoramiento_productivo_del_cultivo_del_pelillo)
- Carbajal, W., J. De la Cruz y J. Galán. 2005. Prospección del recurso *Chondracanthus chamissoi* “cochayuyo” en la caleta de Chérrepe (Lambayeque), julio 2005. Inf. Inst. Mar Perú (Imarpe). 7 p.
- Castañeda, M., F. Díaz, S. Arbaiza y P. Baltazar. 2018. Evaluación del fotoperiodo en el asentamiento de tetrasporas de *Chondracanthus chamissoi* sobre cuerdas de polipropileno en condiciones semicontroladas de laboratorio. An. Cient., 79(2): 459-465. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.1256>
- Collantes, G., C. Melo and A. Candia. 2004. Micropropagation by explants of *Gracilaria chilensis* Bird, McLachlan and Oliveira. J. Appl. Phycol., 16(3): 203-213. <https://doi.org/10.1023/B:JAPH.0000048506.58928.4d>
- Correa, J.A., J. Beltrán, A.H. Buschmann and R. Westermeier. 1999. Healing and regeneration responses in *Gigartina skottsbergii* (Rhodophyta, Gigartinales): Optimization of vegetative propagation for cultivation. J. Appl. Phycol., 11(3): 315-327. <https://doi.org/10.1023/A:1008106527820>
- Echegaray, J. y J. Seoane. 1992. Aspectos sobre la capacidad de regeneración de *Cystoseira mediterranea* Sauvageau. Bot. Complut., 17: 47-53. <https://revistas.ucm.es/index.php/BOCM/article/view/BOCM9292110047A>
- Fletcher, R.L. and S.M. Fletcher. 1975. Studies on the recently introduced brown alga *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt. II. Regenerative ability. Bot. Mar., 18(3): 157-162. <https://doi.org/10.1515/botm.1975.18.3.157>
- Flores, D., J. Zavala, S. Donayre, A. Guardia y H. Sarmiento. (2015). Evaluación poblacional de *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh, 1820) en las bahías de Pisco y Paracas, otoño 2010. Inf. Inst. Mar. Perú (Imarpe), 42(4): 504-509. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/2998>



- Fulcher, R.G. and M.E. McCully. 1969. Histological studies on the genus *Fucus*. IV. Regeneration and adventive embryony. *Canad. J. Bot.*, 47(11): 1643-1649. <https://doi.org/10.1139/b69-239>
- Gómez, I. and R. Westermeier. 1991. Frond regrowth from basal disc in *Iridaea laminarioides* (Rhodophyta, Gigartinales) at Mehuin, southern Chile. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 73: 83-91. <https://doi.org/10.3354/meps073083>
- Guiry, M. D. 2024. How many species of algae are there? A reprise. Four kingdoms, 14 phyla, 63 classes and still growing. *J. Phycol.*, 00: 1-15. <https://doi.org/10.1111/jpy.13431>
- Halm, H., U. Luder and C. Wiencke. 2011. Induction of phlorotannins through mechanical wounding and radiation conditions in the brown macroalga *Laminaria hyperborea*. *Eur. J. Phycol.*, 46(1): 16-26. <https://doi.org/10.1080/09670262.2010.511277>
- Hurtado-Ponce, A. Q. 2002. Seaweed research at SEAFDEC/AQD. In: A.Q. Hurtado, N.G. Guanzon, Jr., T.R. de Castro-Mallare and M.R.J. Luhan (Eds.) *Proc. Nat. Seaweed Plan. SEAFDEC Aq. Dep., Tigbauan, Iloilo*. 100 p.
- Hurtado, A.Q. and A.B. Biter. 2007. Plantlet regeneration of *Kappaphycus alvarezii* var. adik-adik by tissue culture. *J. Appl. Phycol.*, 19(6): 783-786. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9269-1>
- Icochea, E. 2008. Bases biológicas para el manejo del recurso *Chondracanthus chamissoi* en el litoral marino de Huanchaco, departamento La Libertad, Perú. Tesis M. Sc. Univ. Nal. Trujillo, Trujillo, 50 p. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/2285>
- Kimathi, A., J. Wakibia and M. Gichua. 2018. Growth rates of *Euचेuma denticulatum* and *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta; Gigartinales) cultures using modified off-bottom and floating raft techniques on the Kenyan coast. *WIO J. Mar. Sci.*, 17(2): 11-24. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v17i2.2>
- Kling, R. and M. Bodard. 1987. Morphogenesis of the frond of *Gracilaria verrucosa* (Huds.) Papenfuss: The differentiation of vegetative and sexual areas. *Hydrobiologia*, 151/152: 205-206. <https://doi.org/10.1007/BF00046129>
- Koste, F. 2017. Cultivo integrado de chicorea de mar (*Chondracanthus chamissoi*) y trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación acuícola (SRA), a nivel experimental en la región biobío. Tesis Ing. Civ. Biotec. Acuí. Univ. Cat. Sant. Concepción, Concepción. 65 p. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1218>
- Kyoung, H.E., C.Y. Chul and S.C. Hyun. 1999. Reuse of holdfasts in *Hizikia* Cultivation. *J. Kor. Fish. Soc.*, 32(1): 112-116. <http://koreascience.or.kr/article/JAKO199923607621797.page>
- Lobban, C. S. and P.J. Harrison. 1994. *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 385 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626210>
- Macchiavello, J., C.R. Bulboa and M. Edding. 2003. Vegetative propagation and spore-based recruitment in the carrageenophyte *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta) in northern Chile. *Phycol. Res.*, 51(1): 45-50. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.00292.x>
- Macchiavello, J., C. Bulboa, C. Sepúlveda, K. Véliz, F. Sáez, L. Vega y R. Véliz. 2012. Manual de cultivo de *Chondracanthus chamissoi* (Chicoria de Mar). Alternativas tecnológicas para el estudio de *C. chamissoi* en la zona norte de Chile a partir de discos de fijación secundaria. Univ. Cat. Norte, Antofagasta. 44 p. [https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/Manual\\_chicoria\\_UCN.pdf](https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/Manual_chicoria_UCN.pdf)
- Macchiavello, J., C. Sepúlveda, H. Basaure, F. Sáez, D. Yáñez, C. Marín and L. Vega. 2017. Suspended culture of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta; Gigartinales) in Caleta Hornos (northern Chile) via vegetative propagation with secondary attachment discs. *J. Appl. Phycol.*, 30(2): 1149-1155. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1307-z>
- Machado, S. 2015. Producción de *Ulva* a partir de un sistema de recirculación acuícola. Condiciones hidrodinámicas y eliminación de nutrientes. Tesis Bach. Univ. Politèc. Catalunya, Castelldefels. 72 p. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/78244>
- Mantri, V.A., R.P. Singh, A.J. Bijo, P. Kumari, C.R.K. Reddy and B. Jha. 2011. Differential response of varying salinity and temperature on zoospore induction, regeneration and daily growth rate in *Ulva fasciata* (Chlorophyta, Ulvales). *J. Appl. Phycol.*, 23(2): 243-250. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9544-4>
- Mateo-Cid, L.E., A.C. Mendoza-González, R. Alvarado-Villanueva, M.D.R. Ortega-Murillo, J.G.A. Ceballos-Corona, J.D. Sánchez-Heredia y I. Méndez Guzmán. 2020. Lista actualizada y nuevos registros de las algas rojas (Rhodophyta) del litoral de Michoacán, México. *Rev. Mex. Biodivers.*, 91: e913353. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3353>
- Mooney, P. A. and J. van Staden. 1985. *In vitro* plantlet formation and multiple shoot induction in *Sargassum heterophyllum*. *S. Afr. J. Bot.*, 51(1): 41-44. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(16\)31700-8](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(16)31700-8)
- Orduña-Rojas, J. and D. Robledo. 1999. Effects of irradiance and temperature on the release and growth of carpospores from *Gracilaria cornea* J. Agardh (Gracilariales, Rhodophyta). *Bot. Mar.*, 42(4): 315-319. <https://doi.org/10.1515/BOT.1999.035>
- Pacheco-Ruiz, I., J. Zertuche-González and J. Espinoza-Ávalos. 2005. The role of secondary attachment discs in the survival of *Chondracanthus squarrosus* (Gigartinales, Rhodophyta). *Phycologia*, 44(6): 629-631. [https://doi.org/10.2216/0031-8884\(2005\)44\[629:TROSAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2216/0031-8884(2005)44[629:TROSAD]2.0.CO;2)
- Pariona, E. y P. Gil-Kodaka. 2011. Colonización de *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) sobre sustratos calcáreos en Playa Mendieta, Reserva Nacional de Paracas. *An. Cient.*, 72(1): 19-26. <https://doi.org/10.21704/ac.v72i1.854>
- Ram, M., M.R. Vijayaraghavan and S.B. Babbar. 2000. Wound response and regeneration in *Coelarthrum opuntia*. *Aquat. Bot.*, 68(4): 345-351. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00117-0)

- Ramírez, M.E. y B. Santelices. 1991. Catálogo de las algas marinas bentónicas de la costa temperada del Pacífico de Sudamérica. Fac. Cienc. Biol., Pont. Univ. Cat. Chile, Santiago. 437 p. [https://www.si.edu/object/siris\\_sil\\_931584](https://www.si.edu/object/siris_sil_931584)
- Riofrío, O.L. 2003. Efecto de la variabilidad térmica sobre la biología vegetativa y reproductiva de *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kutzing (Rhodophyta) en la bahía de Ancón, Perú. Tesis Biol. Univ. Nal. Mayor San Marcos, Lima. 47 p.
- Saavedra, S., P. Henríquez, P. Leal, F. Galleguillos, S. Cook y F. Cárcamo. 2019. Cultivo de macroalgas: diversificación de la acuicultura de pequeña escala en Chile. Inst. Fom. Pesq., Puerto Montt, 106 p. [https://www.ifop.cl/wp-content/uploads/manuales/Manual\\_Macroalgas\\_IFOP.pdf](https://www.ifop.cl/wp-content/uploads/manuales/Manual_Macroalgas_IFOP.pdf)
- Sáez, F. and J. Macchiavello. 2018. Secondary attachment discs: A new alternative for restoring populations of *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta). Lat. Am. J. Aquat. Res., 46(1): 140-146. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue1-fulltext-14>
- Sáez, F., D. Yáñez and J. Macchiavello. 2015. Regeneration of tetrasporophytic and female gametophytic frond of *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta). ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1511.2403>
- Santelices, B. and D. Varela. 1995. Regenerative capacity of *Gracilaria* fragments: Effects of size, reproductive state and position along the axis. J. Appl. Phycol., 7(5): 501-506. <https://doi.org/10.1007/BF00003935>
- Scrosati, R. 1999. Regeneration and reproduction of *Mazzaella cornucopiae* (Rhodophyta, Gigartinales) after frond harvesting. J. Appl. Phycol., 10(6): 531-537. <https://doi.org/10.1023/A:1008029632351>
- Torbom, L. and L. Olivera. 1993. Wound-healing in *Vaucheria longicaulis* Hopphaught var. *macounii* Blum. 2. Cytoplasmic streaming and organelle movement. New Phycol., 124(1): 135-148. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03804.x>
- Vidal, L. y C. O’Ryan. 2015. Chicorea de mar (*Chondracanthus chamissoi*): Situación y perspectivas. Innova Chile (CORFO), Santiago. 68 p. <http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/9122/CHICOREA%20DE%20MAR%20-%20SITUACION%20Y%20PERSPECTIVAS%20vF.pdf?sequence=4>
- Yang, M. Y., E. C. Macaya and M. S. Kim. 2015. Molecular evidence for verifying the distribution of *Chondracanthus chamissoi* and *C. teedei* (Gigartinales, Rhodophyta). Bot. Mar., 58(2): 103-113. <https://doi.org/10.1515/bot-2015-0011>
- Yong, W.T.L., S.H. Ting, Y.S. Yong, V.Y. Thien, S.H. Wong, W.L. Chin, K.F. Rodrigues and A. Anton. 2014. Optimization of culture conditions for the direct regeneration of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae). J. Appl. Phycol., 26(3): 1597-1606. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0191-4>
- Zapata, J. C. (2018). Estudio comparativo en la propagación vegetativa de *Chondracanthus chamissoi* “YUYO” en tres tipos de sustrato en ambiente controlado en la región Moquegua. Tesis Ing. Pesq. Univ. Nal. Moquegua, Moquegua. 81 p. <http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/75>
- Zhou, W., Z. Sui, J. Wang, Y. Hu, K.H. Kang, H.B. Kim and Z. Niaz. 2016. Mass cultivation of economically important red alga *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariaceae, Rhodophyta) from tetraspores and carpospores. Aquaculture, 460(25-31): 0044-8486. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.03.052>

RECIBIDO / RECEIVED: 24/08/2023

ACEPTADO / ACCEPTED: 16/04/2024



## Variación del nivel del mar en el Caribe de Costa Rica, Centroamérica

### Sea level variation in the Caribbean of Costa Rica, Central America

José Francisco Valverde Calderón<sup>1</sup> y Gustavo Barrantes Castillo<sup>2\*</sup>

0000-0003-3926-1761

0000-0003-2130-8883

1. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Universidad Nacional. jose.valverde.calderon@una.cr

2. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Costa Rica. gbarrantes@una.cr

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Entre las consecuencias del cambio climático en los sistemas costeros está el cambio del nivel del mar, el cual funciona como una línea base sobre la cual opera una variedad de procesos costeros, a diferentes escalas de tiempo y espacio. La presente investigación tiene por objetivo calcular la tasa histórica y actual de ascenso del nivel del mar a partir de datos de la estación mareográfica Limón. Para esto se utilizaron dos métodos: el análisis de regresión lineal simple y una descomposición de series temporales. Como resultado se obtuvo una tasa de cambio del nivel del mar para el período 1952 a 1968 de 2.32 mm/año con el primer método y 3.41 mm/año para el segundo método, que es consecuente con las publicaciones existentes. En el caso del período actual (2009 a 2021) se obtuvo una tasa de 4.18 mm/año para el primer método y 4.28 mm/año con el segundo método. Los resultados obtenidos confirman que existe una tendencia al aumento del nivel del mar en la región estudiada, situación que debe ser considerada al estudiar las transformaciones que están ocurriendo en la costa, como lo son la erosión costera identificada en algunas zonas del Caribe costarricense.

**PALABRAS CLAVE:** cambio climático, erosión costera, mareógrafo, serie de tiempo, tendencias

#### ABSTRACT

One of the consequences of climate change is sea level change in coastal systems, which function as a baseline, where a variety of coastal processes operate at different time and space scales. The objective of the present research is to calculate the historic and current rate of sea level rise, from Limon tide gauge station's data. Two methods were utilized for this purpose: Simple linear regression analysis and time series decomposition; with the first method, a rate of 2.32 mm/yr of sea level change was obtained for the time period 1952 to 1968; with the second one, a rate result of 3.41 mm/yr which is consequent with the existing publications. In the current period (2009 – 2021) a rate of 4.18 mm/yr was obtained with the first method and 4.28 mm/yr with the second method. The results gathered confirm the existence of an upward trend in sea level rise in the studied region. This situation should be considered when studying the transformation taking place in the coast, such as the coastal erosion identified in some of the Costa Rican Caribbean zone.

**KEYWORDS:** climate change, coastal erosion, tide gauge, time series, trend

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es definido como el cambio en los patrones del clima, causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero desde sistemas naturales y por actividades humanas (Faswy *et al.*, 2020). Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) son las que conforman la mayor parte de las emisiones antrópicas de los últimos 150 años y estas se producen mediante la combustión de hidrocarburos y carbón (Barros y Camilloni, 2020). Este cambio ha sido estudiado a través de observaciones terrestres, aéreas y espaciales, lo que ha permitido registrar el aumento de la temperatura global y de los océanos, el incremento del nivel del mar y la pérdida de las masas de hielo de los polos y glaciares (Shaftel, 2021). Por su parte, Masselink y Gehrels (2015) consideran que las dos consecuencias más importantes del cambio climático para los sistemas costeros son el cambio de nivel del mar y el incremento en las tormentas que repercuten en la erosión costera y las inundaciones.

Según Dawahidi *et al.* (2019), el nivel medio del mar “se define como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un período determinado de tiempo (meses, años), de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas queden compensados”. La determinación del nivel medio del mar se realiza mediante el análisis de los datos capturados con un mareógrafo, el cual es un instrumento que permite registrar los movimientos verticales del mar (Pons Valls, 2009) así como mediante el uso de técnicas satelitales como la altimetría satelital (Vignudelli *et al.*, 2021).

El nivel del mar ha cambiado constantemente a través de toda la historia conocida. Durante los últimos 3000 años hubo un nivel del mar estable con una tasa media de ascenso a nivel mundial de 1.1 mm/año (Dawahidi *et al.*, 2019). Llama la atención que en el caso del Caribe se estima que para los últimos 12000 años el nivel del mar nunca estuvo por encima del nivel actual (Khan *et al.*, 2017). De acuerdo con el IPCC (2021), en términos globales el nivel del mar aumentó 0.20 m entre 1901 y 2018, mostrando una aceleración del proceso en los últimos años, cuando la tasa promedio pasó de 1.3 mm/año entre 1901 y 1971, a 1.9 mm/año entre 1971 y 2006, hasta alcanzar los 3.7 mm/año entre 2006 y 2018. Se proyecta que el cambio en el nivel del mar afectará a aproximadamente el 70 % de las costas del mundo (Wong *et al.*, 2014). No obstante, hay que destacar

## INTRODUCTION

Climate change is defined as the change in climate patterns, mainly caused by the emission of greenhouse gases from natural systems and due to human activities (Faswy *et al.*, 2020). Carbon dioxide emissions (CO<sub>2</sub>) make up the majority of anthropic emissions in the last 150 years, and they are caused by the combustion of hydrocarbons and coal (Barros and Camilloni, 2020). This change has been studied by means of land, aerial, and space observations, which has allowed recording the global and sea temperature increase, the sea level rise, and the loss of ice masses in poles and glaciers (Shaftel, 2021). Masselink and Gehrels (2015) state that the two most significant consequences of climate change on coastal ecosystems are changes in sea level and an increase in storms, both of which impact coastal erosion and flooding.

According to Dawahidi *et al.* (2019), the mean sea level “is defined as the level of the calm sea waters averaged over a specified period of time (months, years), such that the periodical effects of tides and other frequent causes, such as waves, are compensated for”. The mean sea level is determined by analyzing the data captured with a tide gauge, an instrument that allows recording the sea’s vertical movements (Pons Valls, 2009), as well as via techniques such as satellite altimetry (Vignudelli *et al.*, 2021).

The sea level has constantly changed throughout known history. In the last 3000 years, the sea level has been stable, with an average global rise rate of 1.1 mm/year (Dawahidi *et al.*, 2019). It is noteworthy that, in the case of the Caribbean, the sea level has never been estimated to be above the current level in the last 12000 years (Khan *et al.*, 2017). According to the IPCC (2021), the global sea level increased by 0.20 m between 1901 and 2018, a process that has been accelerated in recent years, with the average rate going from 1.3 mm/year (1901-1971) to 1.9 mm/year (1971-2006), reaching 3.7 mm/year between 2006 and 2018. The sea level change is expected to affect approximately 70 % of the world’s coasts (Wong *et al.*, 2014). Nevertheless, it should be highlighted that this increase and its corresponding rate are not uniform in time or space, with higher or lower values for different regions of the planet (Church *et al.*, 2013).

In the case of Costa Rica, several works have warned about an accelerated coastal erosion in the Caribbean (Lizano and Gutiérrez, 2011; Lizano, 2013; Barrantes *et al.*, 2020). For their part, Barrantes and Sandoval (2021)

que este aumento y su respectiva tasa no son uniformes, ni en el tiempo ni en el espacio, resultando mayor o menor en diferentes regiones del planeta (Church *et al.*, 2013).

En el caso costarricense, varias investigaciones han advertido sobre una erosión costera acelerada en el Caribe (Lizano y Gutiérrez, 2011; Lizano, 2013; Barrantes *et al.*, 2020). Por su parte, Barrantes y Sandoval (2021) documentan que para la costa del Caribe sur de Costa Rica, 23.4 % de la línea de costa experimenta un retroceso mayor a 0.5 m/año. Estos autores destacan procesos erosivos importantes entre Cieneguita y la desembocadura del río Banano, con una tasa media de - 1.58 m/año, en Cahuita - 2.15 m/año, en Manzanillo - 2.1 m/año, en Gandoca - 1.2 m/año y en Puerto Vargas erosión intensa, en el orden de - 3 m/año. También advirtieron que no hay estudios que indiquen la tasa de cambio actual del nivel del mar en la costa del Caribe, parámetro que se podría vincular con la severidad de los procesos observados.

Asociado a lo anterior, el crecimiento de la población, la urbanización, la migración, el desarrollo turístico y el desplazamiento de poblaciones está incrementando la cantidad de personas y bienes expuestos en las denominadas Zonas Costeras de Baja Elevación (ZCBE); en otras palabras, se experimenta un aumento del número de personas, infraestructuras y activos ubicados en áreas costeras, lo que implica un incremento de riesgo relacionado con el ascenso del nivel del mar (IPCC, 2019). La presente investigación tiene por objetivo determinar la tasa actual de ascenso del nivel del mar para el Caribe costarricense, con base en los datos disponibles en la estación mareográfica de Limón, debido a la falta de estimaciones actuales y a su relevancia para comprender transformaciones que están ocurriendo en la costa, como la erosión costera y las consecuencias que este proceso puede generar a futuro en esta región.

## ÁREA DE ESTUDIO

La estación mareográfica analizada en el presente estudio está ubicada en el litoral Caribe costarricense, el cual se localiza entre las coordenadas 10° 55' 47.53" N, 83° 40' 2.75" O en su extremo norte y 9° 34' 20.38" N y 82° 33' 53.24" O en su extremo sur. Desde el punto de vista técnico, este litoral puede ser dividido en dos secciones: la sección norte que presenta características de un margen continental pasivo y un régimen tectónico extensivo (fallas normales), mientras que la sección sur presenta un régimen

documentado que, for Costa Rica's southern Caribbean coast, 23.4 % of the coastline experiences a retreat greater than 0.5 mm/year. These authors highlighted significant erosive processes between Cieneguita and the Banano river mouth, with an average rate of - 1.58 m/year; in Cahuita, with - 2.15 m/year; in Manzanillo, with - 2.1 m/year; and in Gandoca, with -1.2 m/year. Additionally, they noted intense erosion in Puerto Vargas, on the order of - 3 m/year. They also warned that there are no studies indicating the current sea level change rate in the Caribbean coast, a parameter that could be linked to the severity of the observed processes.

In relation to the above, population growth, urbanization, migration, touristic development, and population displacement are causing an increase in the amount of exposed people and goods in the so-called low-elevation coastal zones (LECs). In other words, there is an increased number of people, infrastructure, and assets located in coastal areas, implying increased risk with regard to the sea level rise (IPCC, 2019). This research aims to determine the current sea level rise rate for the Costa Rican Caribbean, based on the available data from the Limón tide gauge station, given the lack of current estimations and the relevance of this issue in understanding the transformations taking place on the coast, such as coastal erosion and its potential consequences for the future of this region.

## STUDY AREA

The tide gauge station analyzed in this study is located in the Caribbean littoral of Costa Rica, which is located between the coordinates 10° 55' 47.53" N, 83° 40' 2.75" W (north end) and 9° 34' 20.38" N and 82° 33' 53.24" W (south end). From a technical point of view, this littoral may be divided into two sections: the northern section, which features the characteristics of a passive continental margin and an extensive tectonic regime (normal faults), while the southern section exhibits a compressive regime with the occurrence of significant earthquakes (Alvarado and Cárdenas, 2016).

The climate of this region is characterized by the lack of a defined dry season, exhibiting two periods during which precipitations decrease, the first from February to March, and the second between September and October (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). As for the tides, the Caribbean coast of Costa Rica shows microtidal conditions, with the tides rarely above 30 cm and an average tide of 15 cm (Lizano, 2006). The waves originate from

compresivo con ocurrencia de terremotos importantes (Alvarado y Cárdenas, 2016).

El clima de esta región se caracteriza por no presentar una estación seca definida, mostrando dos períodos en que disminuyen las precipitaciones, el primero de febrero a marzo y el segundo entre setiembre y octubre (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). En cuanto a las mareas, la costa Caribe costarricense presenta una condición micromareal donde las mareas raramente superan 30 cm, con una marea promedio de 15 cm (Lizano, 2006). El oleaje proviene del nororiente, con períodos promedio de ola de 7.38 s y un carácter marcadamente local; la mayor energía se produce en los últimos y los primeros meses del año, contrariamente la menor energía se presenta de septiembre a octubre cuando disminuyen los vientos alisios (Lizano, 2009).

La estación mareográfica analizada se encuentra en las siguientes coordenadas aproximadas: 9.98° N, 83.02° O, que corresponden con la ubicación del muelle Alemán, en la ciudad de Limón. En la Figura 1 se muestra la ubicación de la estación, representada mediante un círculo morado.

the Northeast, with average wave periods of 7.38 s and a distinctly local character. The highest energy levels occur in the first and last months of the year. Conversely, the lowest values are observed between September and October, when the trade winds decrease (Lizano, 2009).

The analyzed tide gauge station is located in the following approximate coordinates: 9.98° N, 83.02° W, corresponding to the location of the Alemán pier, in the city of Limón. Figure 1 shows the location of the station, denoted by a purple circle.

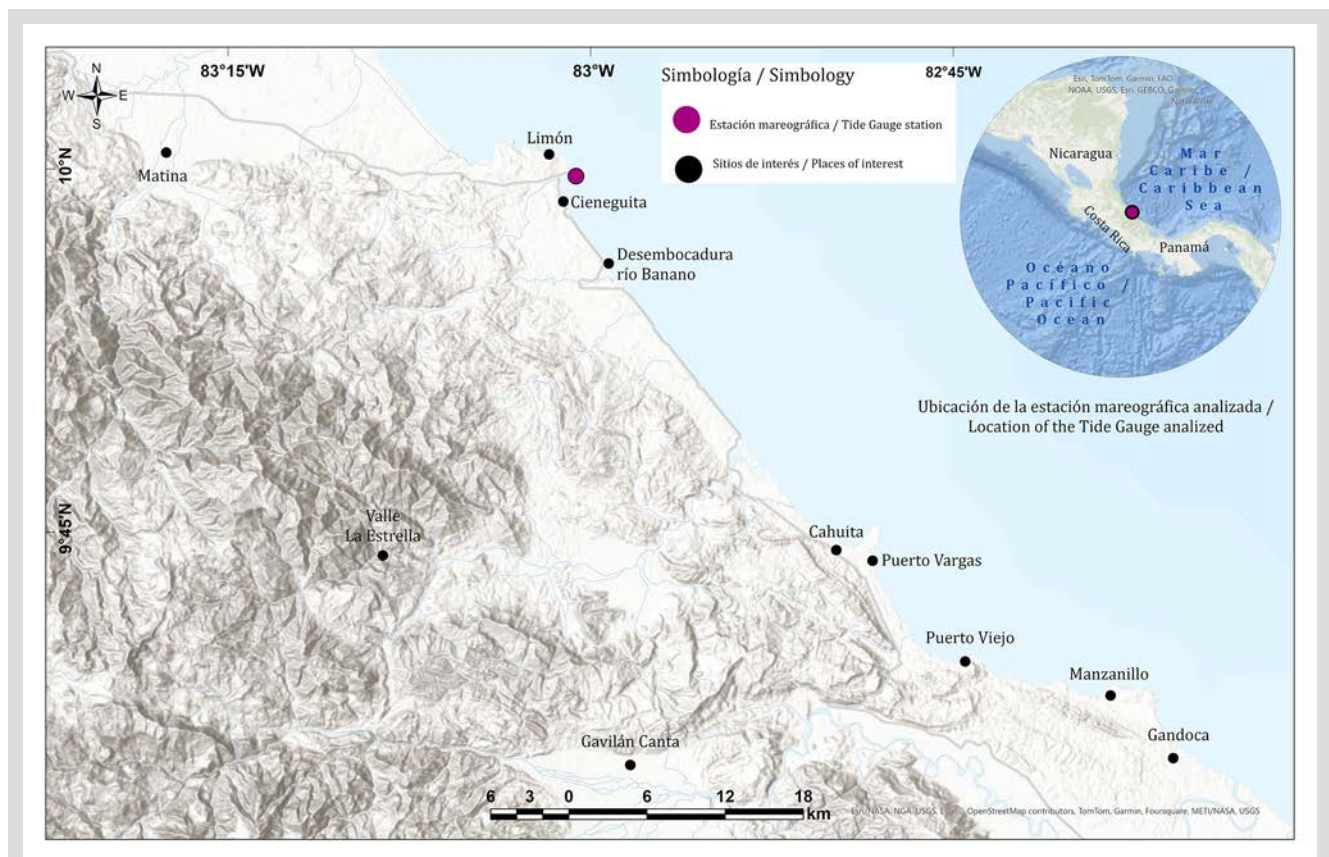


Figura 1. Ubicación aproximada de la estación mareográfica Limón, Costa Rica y otros sitios de interés

Figure 1. Approximate location of the Limón tide gauge station (Costa Rica) and other places of interest



## MATERIALES Y MÉTODOS

La primera acción realizada fue localizar los registros (tanto históricos como actuales) de las estaciones mareográficas ubicadas en el Caribe costarricense. Después de esta revisión, se determinó que a lo largo de la historia sólo han existido instalaciones de mareógrafos en el puerto de Limón, cuyos registros no son continuos en el tiempo, sino que están segmentados. Se distinguen tres segmentos de datos: de 1948 a 1968, de 1970 a 1981 y desde 2009 a la actualidad, no coincidiendo las ubicaciones espaciales.

Los datos correspondientes al período 1948 a 1968 fueron descargados del sitio en internet del Servicio Permanente del Nivel del Mar (PSMSL), con una frecuencia mensual. Por su parte, los datos del período 1970 a 1981 fueron descargados del sitio indicado anteriormente, pero no fueron analizados, siguiendo la recomendación de Torres Parra *et al.* (2006), quienes afirman que este conjunto de datos presenta inconsistencias, como la falta de datos para 1975, hay 13 periodos con longitudes de al menos un mes donde no hay datos y se reporta que la incertidumbre de las observaciones es de varios centímetros, descartándose porque la serie es corta e incompleta.

Los datos de la actual estación mareográfica (instalada en 2009) se descargaron del Centro del Nivel del Mar (UHSLC), ubicado en la Universidad de Hawái. Este centro publica los datos con dos calidades: el primero denominado *Research Quality* (RQ), el cual son datos analizados y se consideran la versión final, mismos que pueden ser utilizados con fines de investigación, pero tienen la característica de que se publican con una latencia de entre uno y dos años, dependiendo de proceso que se le deba aplicar a las observaciones; el segundo tipo de datos son los calidad *Fast Delivery* (FD), a los cuales se les ha aplicado un control de calidad más básico, orientado a la identificación de errores en las observaciones. Este tipo de datos se publican con una latencia de entre uno y dos meses. Así, para los fines de la presente investigación, se combinaron datos calidad RQ con FD con la intención de contar con una mayor longitud de la serie temporal, debido a que los datos con calidad RQ llegan hasta el 31 de diciembre de 2018. En la Tabla 1 se muestra información sobre los conjuntos de datos analizados. Como dato adicional, para el período de 1948 a 1968 la estación mareográfica tiene asignado el código 552 del Sistema de Observación del Nivel del Mar Global (GLOSS, por sus siglas en inglés).

## MATERIALS AND METHODS

The first step was to locate the records (both historical and current) of the tide gauge stations in the Caribbean of Costa Rica. After this review, it was determined that, throughout history, there have only been tide gauge facilities in the Limón harbor, whose records are not continuous in time but are segmented. Three data segments can be identified: from 1948 to 1968, from 1970 to 1981, and from 2009 to the present date, with spatial locations that do not coincide.

The data corresponding to the 1948-1968 period were downloaded from the website of the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), with a monthly frequency. The data on the 1970-1981 period were also downloaded from the aforementioned site, but they were not analyzed, following the recommendations of Torres Parra *et al.* (2006), who stated that this dataset exhibits some inconsistencies, such as the lack of data for 1975 and the fact that there are 13 periods of at least one month with no data and reporting observation uncertainties of several centimeters. These data were discarded because the series is short and incomplete.

The data corresponding to the current tide gauge station (installed in 2009) were downloaded from the Sea Level Center (UHSLC), located in the University of Hawaii. This center publishes data with two qualities, the first one denoted as research quality (RQ), which corresponds to analyzed data that are regarded as a final version and can be used for research purposes, albeit published with a latency of one to two years depending of the processing applied to the observations; and the second one called fast delivery (FD), whose data have undergone a more basic quality control oriented towards the identification of observation errors. This type of data is published with a latency of one to two months. Thus, for the purposes of this research, RQ and FD data were combined, aiming to obtain a longer time series, given that the RQ data extend only until December 31, 2018. Table 1 shows the information of the analyzed datasets. As an additional detail, for the period from 1948 to 1968, the tide gauge station was assigned code 552 by the Global Sea Level Observing System (GLOSS).

**Tabla 1.** Descripción de los datos analizados.

Período / Period	1952 - 1968	2009 - 2021
Cantidad de años analizados / Number of years analyzed	16	12
Frecuencia de los registros / Record frequency	mensual / monthly	diaria / daily
Calidad de los datos analizados / Quality of the analyzed data	Revised Local Reference (RLR) / Revised Local Reference (RLR)	Research Quality (RQ) para el período del 16 de octubre de 2009 al 31 de diciembre de 2018; Fast Delivery (FD) para el período del 01 de enero 2019 al 31 de mayo de 2021 / Research quality (RQ) for the period between October 16, 2009, and December 31, 2018; and fast delivery (FD) for the period between January 01, 2019, and May 31, 2021
Fuente de los datos / Data source	PSMSL	UHSLC
Cantidad de registros faltantes / Number of missing records	0	67
Porcentaje de registros faltantes / Percentage of missing records	0.0 %	1.57 %

**Table 1.** Description of the analyzed data

Previo a determinar las tasas de cambio del nivel del mar, los datos fueron analizados realizando dos procesos, ambos en el programa Matlab®: el primero fue una revisión visual de los datos, mediante la graficación de estos. Esto se efectuó con el fin de identificar inconsistencias en los datos así como para tener una idea base del comportamiento de la serie. El segundo paso fue el completar la serie, en caso de que esta tuviera datos faltantes. El proceso se realizó mediante la función “*fillmissing*”. Como operador para completar los datos, se usó el dato previo al faltante, esto considerando el bajo porcentaje de datos no disponibles y a que estos están ubicados a lo largo de toda la serie. En el caso de los datos del periodo de 2009 a 2021, como se indica en la Tabla 1 la frecuencia de los datos es diaria, por lo que antes de proceder al análisis de estos, se calcularon los promedios para cada mes, mediante el cálculo de un promedio simple, usando la función “*retime*”, disponible en Matlab®.

Realizado el proceso de revisión de los datos, se procedió a calcular la tendencia de la serie de datos, lo que se interpreta como la tasa de cambio del nivel del mar. Para este fin, se utilizaron dos enfoques, ambos implementados en el programa Matlab®: El método “tradicional”, que consiste en estimar los parámetros de una regresión lineal simple al conjunto de datos, donde la pendiente de la ecuación corresponde con la tasa del cambio del nivel del mar (Jury, 2018).

Descomponer la serie de tiempo: este enfoque parte de la premisa de que una serie de tiempo está conformada por tres componentes: tendencia, estacionalidad y ruido. El objetivo es entonces “aislar” cada elemento de la serie y

Prior to determining the sea level change rates, the data were analyzed via two processes, both of them implemented in the MATLAB software. The first was a visual review of the data by means of plotting. This was done in order to identify inconsistencies in the data, as well as to obtain a base idea of the behavior of the series. The second process involved completing the series if it had any missing data. This was done via the *fillmissing* function. As an operator to complete the missing data, the data point prior to the missing one was used, considering the low percentage of unavailable data and the fact that these are spread throughout the entire series. Regarding the data for the 2009-2021 period, as indicated in Table 1, the frequency is daily, which is why, before the analysis, the average of each month was calculated using the *retime* function.

After the data review process, we calculated the data series trend, which is interpreted as the sea level change rate. To this effect, two approaches were implemented, both of them in the MATLAB software: The ‘traditional’ method, which consists of estimating the parameters of a simple linear regression of the dataset, where the slope of the equation corresponds to the sea level change rate (Jury, 2018).

Decomposing the time series, an approach based on the premise that a time series is made up of three components: trend, seasonality, and noise. Thus, the objective is to ‘isolate’ each element of the series and analyze components of interest. There are two general models for decomposing a time series: an additive model and a multiplicative model.

analizar el componente de interés. Hay dos modelos generales para descomponer una serie de tiempo: un modelo aditivo y un modelo multiplicativo. En este caso, se asume que la serie de datos ( $Y$ ) es la suma de los tres componentes:  $Y = T + S + R$ , donde  $Y$  es la serie,  $T$  es la tendencia,  $S$  es la estacionalidad y  $R$  es el ruido. Para separar los componentes de la serie, se aplicó el método *Singular Spectrum Analysis* (SSA), el cual analiza de forma espectral no paramétrica las series de tiempo, sin partir de ningún modelo a priori (Golyandina *et al.*, 2018).

Como indican Golyandina *et al.* (2018), SSA es un método de análisis multipropósito, lo que lo convierte en una metodología aplicable para resolver problemas en diversas áreas, en particular aquellos asociados a series temporales e imágenes digitales. Una diferencia esencial entre SSA y otros métodos para analizar series de tiempo, donde se presume que hay componentes de tendencia y/o señales periódicas, radica en el hecho de que SSA no requiere ningún modelo de tendencia ni conocimiento previo sobre el número de componentes periódicos y sus frecuencias. Por ende, se consideró para la presente investigación adecuado que sea el propio método el que determine si en los conjuntos de datos hay tendencias y señales periódicas. Finalmente, habiendo aislado el término de tendencia, se estimó la pendiente que representa la tasa del cambio del nivel del mar.

Hay que considerar que el nivel del mar medido por un mareógrafo es relativo a la ubicación del instrumento, el cual puede estar afectado por un movimiento vertical del terreno, tanto de hundimiento como de levantamiento, aproximadamente en el mismo orden de magnitud en el que el nivel del mar sube o baja (Boretti, 2019). El no incluir esta consideración podría llevar a una sobre o subestimación del nivel del mar en el mediano y largo plazo, lo que podría conducir a tomar decisiones inapropiadas para proteger la costa o para orientar el proceso de adaptación (Pabón y Lozano, 2005).

En la presente investigación y en seguimiento a lo indicado anteriormente, se consideró la estación GNSS denominada LIMN, la cual se ubica en las cercanías de la estación mareográfica, con el fin de corregir la tasa de cambio del nivel mar por el movimiento vertical del terreno. Esto solo se hizo para los resultados de la estación mareográfica actual (2009-2021), por cuanto no se cuenta con información sobre el movimiento vertical del terreno para los datos mareográficos históricos (periodo 1952-1968).

La estación LIMN forma parte de la red Sirgas-Con, la cual es una red de estaciones GNSS que están operando y recolectando datos de forma continua, que son procesados

In this case, it was assumed that the data series ( $Y$ ) is the sum of the three components ( $Y = T + S + N$ , where  $Y$  is the series,  $T$  corresponds to the trend,  $S$  denotes seasonality, and  $N$  represents noise). To separate the components from the series, the singular spectrum analysis (SSA) method was applied, which spectrally and non-parametrically analyzes time series without relying on any *a priori* model (Golyandina *et al.*, 2018).

As indicated by Golyandina *et al.* (2018), SSA is a multi-purpose analysis method, which enables its application in solving problems in a diversity of areas, particularly those associated with time series and digital images. An essential difference between SSA and other methods for analyzing time series, where it is assumed that there are trend and periodical signal components, lies in the fact that SSA does not require any trend model or prior knowledge regarding the number of periodical components and their frequencies. Therefore, for this research, we deemed it appropriate for the method itself to determine whether there were any trends and periodic signals in the datasets. Finally, after isolating the trend term, the slope representing the sea level change rate was estimated.

It should be considered that the sea level measured by a tide gauge is relative to the location of the instrument, which can be affected by vertical land motion, both subsidence and uplift, approximately to the same degree as the sea level rises or falls (Boretti, 2019). Not including this consideration could lead to over- or underestimation of the sea level in the medium and long term, as well as to making inadequate decisions to protect the coast or orient the adaptation process (Pabón and Lozano, 2005).

In this research, and based on the above, the GNSS station called LIMN was considered, which is located in the vicinity of the tide gauge station, with the purpose of correcting the sea level change rate regarding vertical land motion. This was only done for the results of the current tide gauge station (2009-2021), as there are no vertical land motion data for the historical tide gauge information (1952-1968 period).

The LIMN station is part of the Sirgas-Con network, a network of GNSS stations that are in operation and collecting data in a continuous manner. These data are processed by analysis centers that generate, among others, weekly solutions. In this vein, the weekly solutions of the LIMN station for the 2010-2023 period were downloaded, and, via a simple linear regression, the vertical velocity was estimated.

por centros de análisis que generan, entre otra información, soluciones semanales. De esta forma, se descargaron las soluciones semanales de la estación LIMN para el período 2010 a 2023 y mediante una regresión lineal simple, se estimó la velocidad vertical.

## RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de analizar los datos para el periodo de 1952 a 1968. Posteriormente, se presentan los resultados de la serie que cubre el período de 2009 a 2021.

### Análisis de los datos del período 1952 a 1968

A pesar de que la serie de datos del PSMSL para la estación mareográfica inicia en 1948, la misma está segmentada por datos perdidos, con un primer período entre abril de 1951 y junio de 1952. Por este corte en el registro, se decide realizar el cálculo con los datos a partir de julio de 1952 y hasta diciembre de 1968, lapso para el cual no hay pérdida de datos.

Los resultados obtenidos al aplicar al conjunto de datos una regresión lineal simple dan una tasa de cambio del nivel del mar de 2.31 mm/año para este período, con un valor  $R^2$  ajustado de 0.07, lo que significa que la regresión lineal solo explica en 7 % de la variabilidad de la variable respuesta. En la Figura 2 se observa la línea de tendencia respectiva.

## RESULTS

This section shows the results obtained after analyzing the data for the 1952-1968 period. Then, the results for the series covering the 2009-2021 period are presented.

### Data analysis for the 1952-1968 period

Despite the fact that the PSMSL data series for the tide gauge station starts in 1948, it is segmented by missing data, with a first period between April 1951 and June 1952. Given this gap in the records, we decided to perform our calculations with the data from July 1952 to December 1968, an interval for which there is no data loss.

The results obtained by applying a simple linear regression to the dataset show a sea level change rate of 2.31 mm/year for this period, with an adjusted  $R^2$  value of 0.07, which means that linear regression only explains 7 % of the variability in the response variable. Figure 2 shows the corresponding trend line.

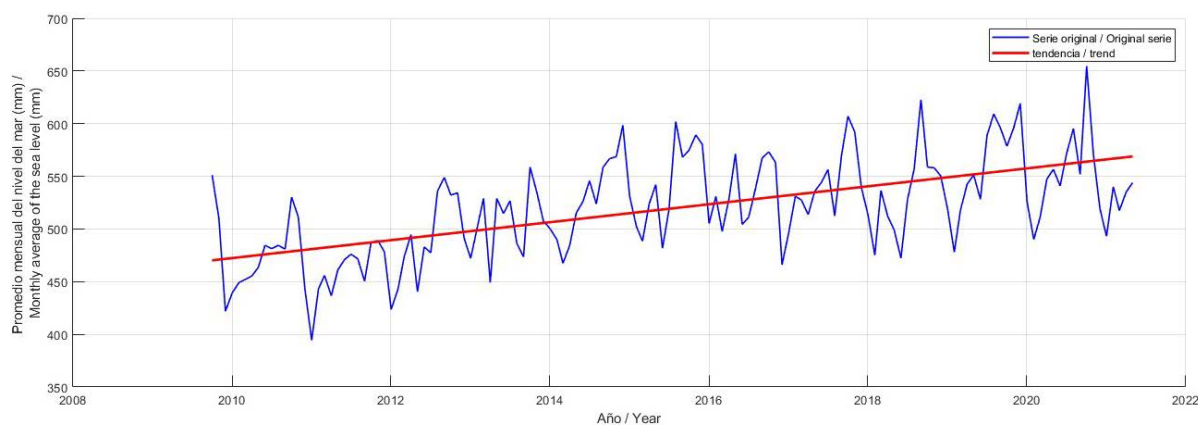
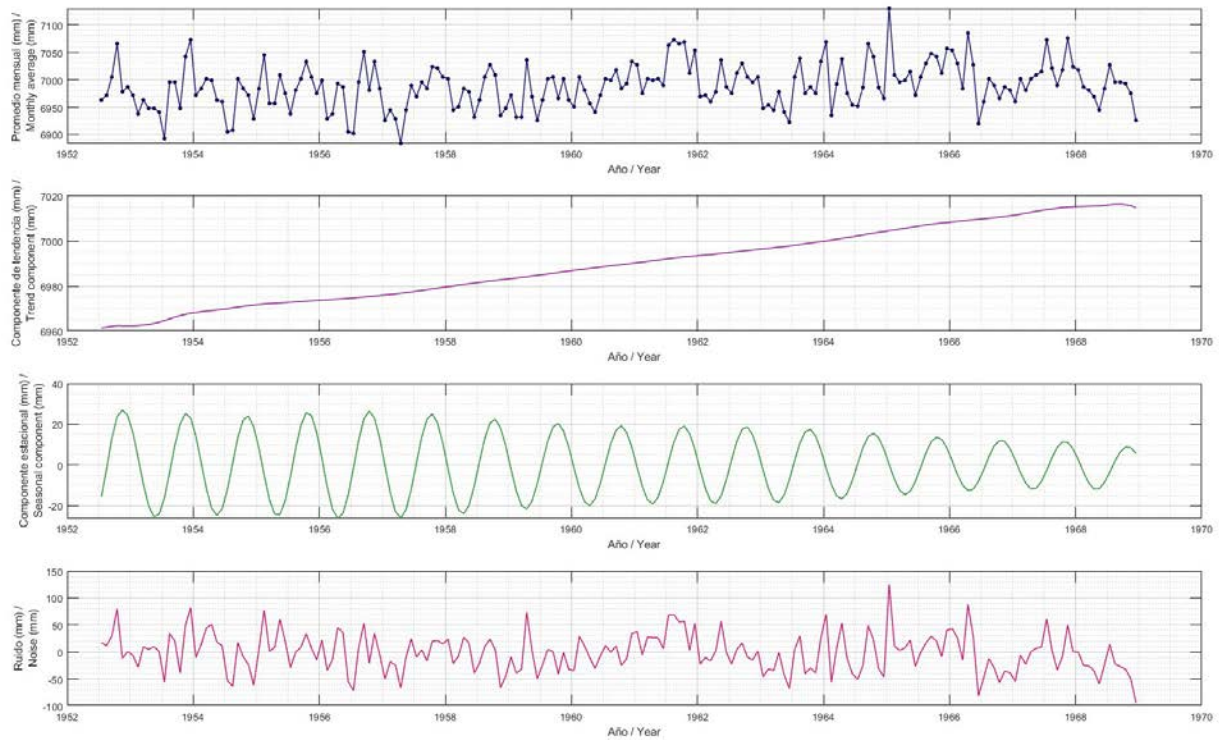


Figura 2. Gráfica de la regresión lineal simple para el período 1952-1968.

Figure 2. Simple linear regression graph for the 1952-1968 period.

Al aplicar el método SSA para descomponer la serie, se obtuvo el componente de tendencia (segundo gráfico en la Figura 3), el componente estacional y ruido (tercer y cuarto gráfico de la Figura 3, respectivamente).

By applying the SSA method to decompose the series, the trend component was obtained (second graph in Figure 3), the seasonal component, and the noise (third and fourth graphs in Figure 3, respectively).

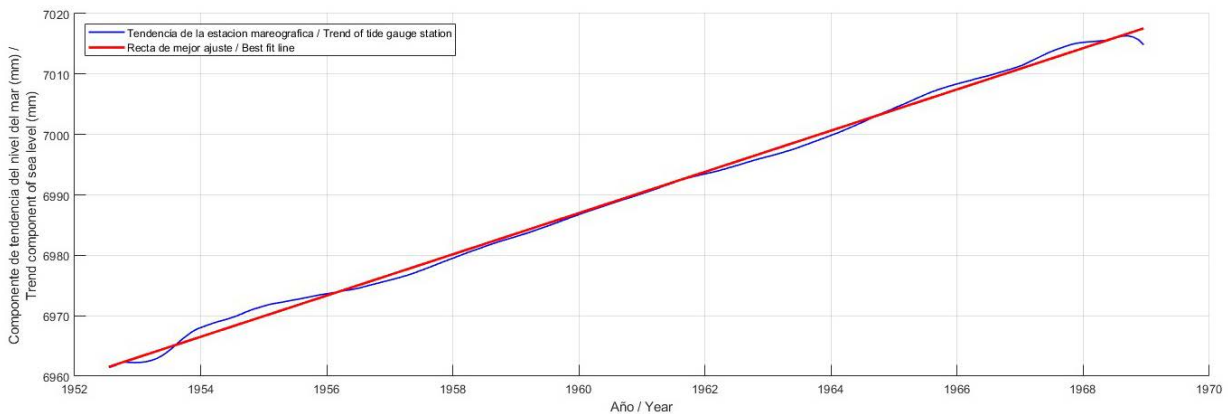


**Figura 3.** Resultados de la descomposición de la serie de tiempo usando el método SSA, para el período 1952-1968.

**Figure 3.** Results of the time series decomposition via the SSA method for the 1952-1968 period.

Tras aplicar una regresión lineal simple al componente de tendencia, se obtuvo una tasa del cambio del nivel del mar de 3.41 mm/año, con un valor del parámetro  $R^2$  ajustado de la regresión de 0.99, lo que significa que el modelo permite explicar casi por completo la variable respuesta, en este caso, el componente de tendencia de la serie de datos. En la Figura 4 se muestra la salida gráfica de la regresión lineal.

After applying simple linear regression to the trend component, a sea level change rate of 3.1 mm/year was obtained, with an adjusted  $R^2$  regression parameter value of 0.99. This means that the model allows almost fully explaining the response variable – in this case, the data series trend. Figure 4 shows the graphic output of the linear regression.



**Figura 4.** Gráfica de la regresión lineal simple aplicada al componente de tendencia resultante de la descomposición para el período 1952-1968.

**Figure 4.** Graph of the simple linear regression applied to the trend component resulting from the decomposition for the 1952-1968 period.

### Análisis de los datos del período 2009 a 2021

Los datos analizados para este periodo corresponden a la actual estación mareográfica, la cual fue instalada en 2009 y está operativa desde entonces. Los datos fueron analizados aplicando el método de regresión lineal simple, obteniéndose como resultado que la tasa de cambio del nivel en 8.51 mm/año. El valor del parámetro  $R^2$  ajustado de la regresión obtenido fue de 0.36, siendo esto que el modelo explica 36 % de la variabilidad de la variable respuesta. La Figura 5 muestra la serie de datos y la línea de tendencia de la regresión lineal.

### Data analysis for the 2009-2021 period

The data analyzed for this period correspond to the current tide gauge station, which was installed in 2009 and has been in operation since. The data were examined via the simple linear regression method, observing a sea level change rate of 8.51 mm/year. The value of the adjusted  $R^2$  regression parameter was 0.36, *i.e.*, the model explains 36 % of the response variable's variability. Figure 5 shows the data series and the trend line for the linear regression.

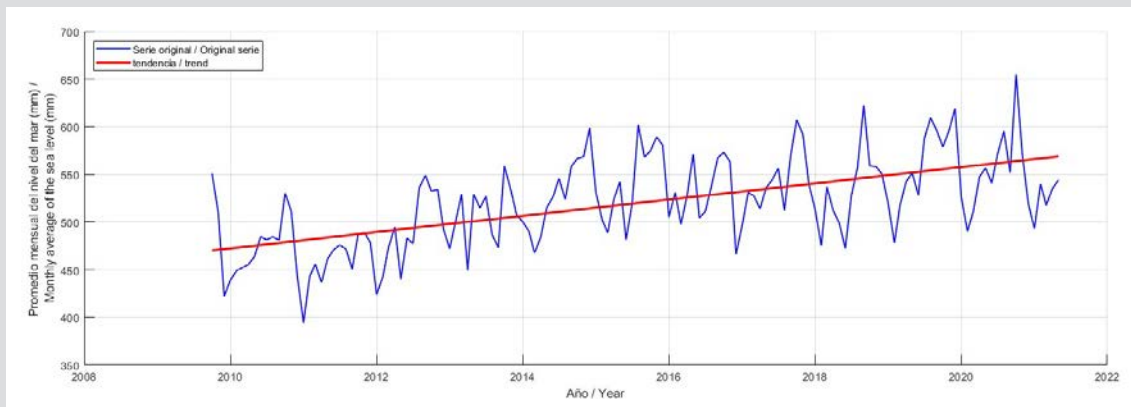


Figura 5. Gráfica de la regresión lineal simple para el período 2009-2021.

Figure 5. Simple linear regression graph for the 2009-2021 period.

Este conjunto de datos también fue analizado aplicando el método SSA para obtener los componentes de la serie. Estos resultados se muestran en la Figura 6, donde el segundo gráfico indica el componente de tendencia.

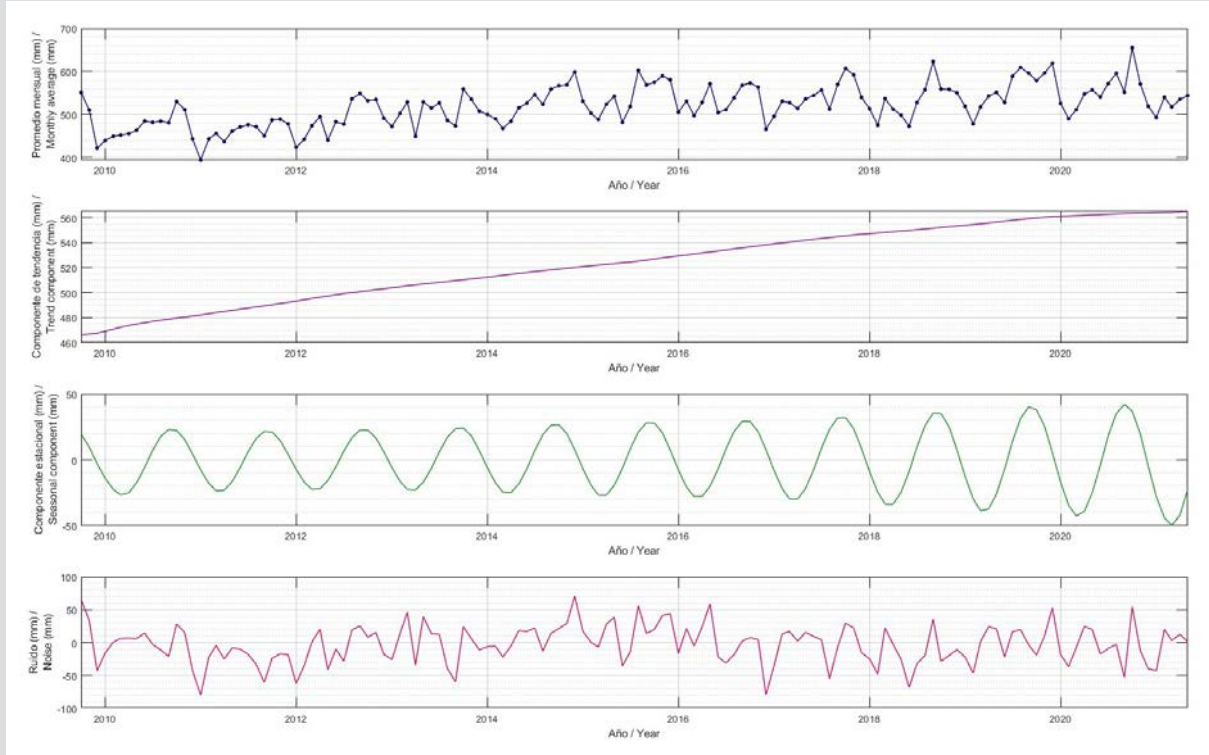
Tras aplicar una regresión lineal simple al componente de tendencia, se obtuvo una tasa del cambio del nivel del mar de 8.61 mm/año, con un valor del parámetro  $R^2$  ajustado de 0.99, interpretándose este valor de forma que el modelo aplicado permite explicar casi por completo la variable respuesta, la cual es el componente de tendencia de la serie de datos. La Figura 7 muestra el componente de tendencia y la recta de la regresión lineal.

Cuando se analizan datos mareográficos, es necesario considerar lo que se define como el *Vertical Land Motion* (VLM), el cual hace referencia al movimiento vertical de la superficie, referente al sitio donde está instalada la estación mareográfica (Mohamed *et al.*, 2019). Para la presente investigación, se utilizó la estación LIMN, para la cual se obtuvo una velocidad vertical de -4.33 mm/año. Al tomar la velocidad vertical de la estación LIMN como valor de referencia para el VLM y que la tasa de cambio estimada a partir de los datos del mareógrafo mediante el método SSA es de 8.61 mm/año para la estación actual, se tiene

This dataset was also analyzed by using the SSA method to obtain the series components. These results are shown in Figure 6. Here, the second graph depicts the trend component.

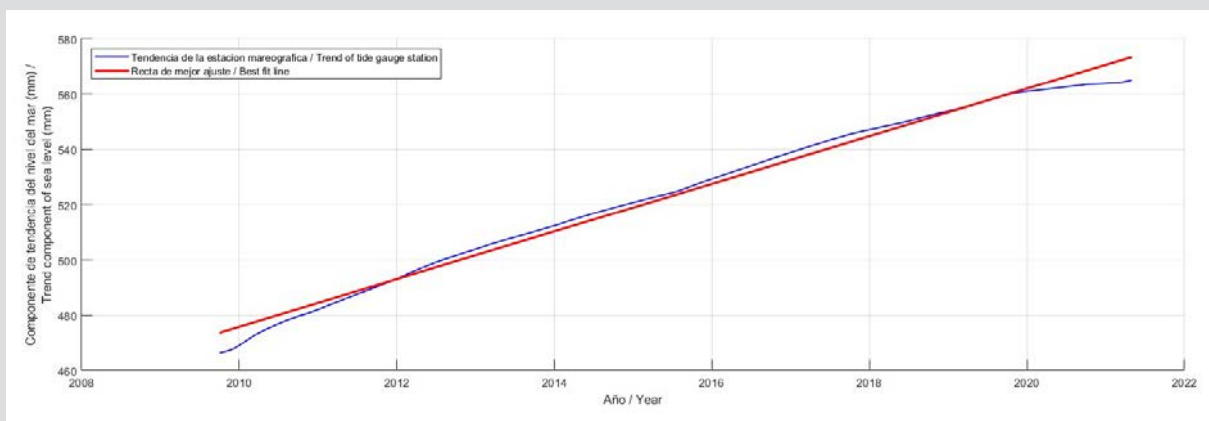
After applying a simple linear regression to the trend component, we obtained a sea level change rate of 8.61 mm/year, with an adjusted  $R^2$  parameter value of 0.99, indicating that the model allows almost fully explaining the response variable, *i.e.*, the trend component of the data series. Figure 7 shows the trend component and the linear regression line.

When analyzing tide gauge data, it is necessary to consider vertical land motion (VLM), defined as the vertical movement of the surface and refers to the place where the tide gauge station is installed (Mohamed *et al.*, 2019). For this research, the LIMN station was employed, measuring a vertical velocity of -4.33 mm/year. By taking the vertical velocity of the LIMN station as a reference VLM value and considering that the change rate estimated from the tide gauge data via the SSA method is 8.61 mm/year for the current station, a sea level change rate of 4.28 mm/year is obtained after subtracting the VLM. This procedure was



**Figura 6.** Resultados de la descomposición de la serie de tiempo usando el método SSA, para el período 2009-2021.

**Figure 6.** Results of the time series decomposition via the SSA method for the 2009-2021 period.



**Figura 7.** Gráfica de la regresión lineal simple aplicada al componente de tendencia resultante de la descomposición para el período 2009-2021.

**Figure 7.** Graph of the simple linear regression applied to the trend component resulting from the decomposition for the 2009-2021 period.

entonces que la tasa de cambio del nivel del mar, restando el VLM, es de 4.28 mm/año. Este procedimiento ha sido sugerido por Araújo (2017) en la costa portuguesa y por Boretti (2019) en la del Caribe mexicano, al considerar variaciones que pueden atribuirse a la tectónica local (Araújo, 2014). Se resumen los resultados obtenidos con los datos del mareógrafo de Limón en la Tabla 2, de la cual se observa que hay un incremento en la tasa de ascenso del nivel del mar cuando se compara la tasa histórica con la actual.

suggested by Araújo (2017) for the Portuguese coast and by Boretti (2019) in the Caribbean coast of Mexico, considering variations attributable to local tectonics (Araújo, 2014). Table 2 summarizes the results obtained with the Limón tide gauge data, observing an increase in the sea level rise rate when comparing the historical and current rates.

**Tabla 2.** Resumen de los resultados obtenidos tras analizar los distintos conjuntos de datos disponibles.

Mareógrafo / Tide gauge	Fecha inicial / Initial date	Fecha final / Final date	Meses / Months	Años / Years	Regresión lineal / Linear regression (mm/año - mm/year)	SSA (mm/año - mm/year)
Limón	Julio / July 15, 1952	Diciembre / December 15, 1968	198	16.5	2.32	3.41
Limón	Octubre / October 16, 2009	Mayo / May 31, 2021	145	11.6	8.52	8.61
Limón, considerando el VLM / Limón, considering VLM	Octubre / October 16, 2009	Mayo / May 31, 2021	145	11.6	4.19	4.28

**Table 2.** Summary of the results obtained after analyzing the different available datasets.

## DISCUSIÓN

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos se hizo una recopilación bibliográfica de publicaciones en las cuales también se han analizado los datos históricos del mareógrafo de Limón. Se debe aclarar que no se encontraron documentos con resultados para la estación mareográfica actual. El resumen de esta recopilación se muestra en la Tabla 3.

## DISCUSSION

With the purpose of comparing the results obtained, we elaborated a bibliographic compilation of publications that have also analyzed historical data of the Limón tide gauge. It should be clarified that no documents with results for the current tide gauge station were found. The summary of this compilation is presented in Table 3.

**Tabla 3.** Resumen de los resultados históricos publicados.

Título de la publicación / Title of the publication	Autores y año / Authors and year	Período datos / Data period	Total de años / Total years	Tasa publicada / Published rate (mm/año - mm/year)	Fuente de los datos / Data source	Método de análisis usado / Analysis method used	Significancia del resultado / Results significance
Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records	Aubrey <i>et al.</i> (1988)	1948–1969	21.0	-1.60	PSMSL	Regresión lineal simple / Simple linear regression	No se reporta este dato / These data are not reported
Regional sea level change and variability in the Caribbean Sea since 1950	Palanisamy <i>et al.</i> (2012)	1950–1968	19	2.20	PSMSL	No se indica el método de análisis empleado / The employed analysis method is not indicated	0.6 (no se indica las unidades) / (units are not indicated)
Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea	Torres y Tsimplis (2013)	1948–1968	20.3	1.70	Hawái, PSMSL	Modelo basado en estimar por mínimos cuadrados el componente de tendencia y señales periódicas / Model based on the least-squares estimation of the trend and periodical signal component	± 0.8 (mm/año) / (mm/year)
Variabilidad y cambio del nivel del mar en Costa Rica	Ballester y Salazar (2012)	1948–1980	32	1.68	PSMSL	Regresión lineal simple / Simple linear regression	No se reporta este dato / These data are not reported

**Table 3.** Summary of the published historical results.



En la Tabla 3 se observan algunas variaciones de los valores presentados en otros trabajos con respecto de los resultados obtenidos en esta investigación, esto cuando se aplica el método de regresión lineal simple a la serie original. Las publicaciones de Ballestero y Salazar (2012) y Torres y Tsimplis (2013) que analizan un mayor período (1948-1969) registran valores similares y próximos al obtenido en esta publicación (Tabla 2). No obstante, en Aubrey *et al.* (1988) el valor aportado es un poco menor y con signo negativo; en dicha publicación no se logró identificar la causa de esta diferencia ya que el método usado para el análisis de los datos es una regresión lineal simple, por lo que es posible asumir un error de digitación o tipográfico.

En el caso de la serie 1950–1968 el valor presentado por Palanisamy *et al.* (2012) no difiere mucho del obtenido en esta publicación (Tabla 2). En términos generales podría asumirse que con una serie de datos más larga se obtienen valores más bajos cuando se aplica el método de regresión lineal simple, o que al cortarse la serie de datos los resultados se ven afectados.

Para el análisis de los resultados de la actual estación mareográfica, se debe considerar que ella se encuentra en el Caribe sur de Costa Rica, donde existe un sistema compresivo compuesto por fallas inversas y pliegues que hacen parte del Cinturón Deformado del Norte de Panamá, mismo que inicia detrás de la ciudad de Limón y se continúa en Panamá (Denyer y Kusssmaul, 2000). Este sistema cambia de dirección y entra por el centro del país para generar el denominado Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, que marca el límite norte de la microplaca de Panamá. Este marco tectónico provoca levantamientos y deformación en ambas costas como resultado de la acumulación de esfuerzos y su posterior liberación (Norabuena *et al.*, 2004; Protti *et al.*, 2014). Resulta particularmente interesante el caso del terremoto de Limón de 1991 en el cual se documentó un levantamiento costero que osciló entre 30 cm y 1.5 m en la costa (Denyer *et al.*, 1994). De este modo, es necesario considerar la corrección relacionada con el efecto deformante del ciclo sísmico en este emplazamiento, corrección que fue realizada a partir de los datos de la estación GNSS denominada LIMN.

En relación con la interpretación de los resultados obtenidos para la actual estación mareográfica en Limón, hay un incremento en la tasa de ascenso del nivel del mar, esto en comparación con respecto al periodo de 1952 a 1968, estimándose la actual tasa en 4.28 mm/año luego de corregir por el movimiento vertical del terreno, lo que en general es consecuente con el aumento global de dicha tasa, la cual

Table 3 shows some variations in our results with regard to the values presented in other works when applying the simple linear regression method to the original series. The publications by Ballestero and Salazar (2012) and Torres and Tsimplis (2013), which analyze a longer period (1948-1969), recorded values similar and close to those of this work (Table 2). However, in Aubrey *et al.* (1988), the value provided is slightly lower and with a negative sign; the publication failed to identify the cause of this difference, since the method used for data analysis was a simple linear regression, so it is possible to assume a typographical or data entry error.

In the case of the 1950-1968 series, the values provided by Palanisamy *et al.* (2012) do not differ much from those obtained in this work (Table 2). In general terms, it could be assumed that a longer data series yields lower values when applying the simple linear regression method, or that interruptions in the data series affect the results.

To analyze the results of the current tide gauge station, its location in the southern Caribbean of Costa Rica, where there is a compressive system composed of inverse faults and folds within the North Panama Deformed Belt, which begins behind the city of Limón and continues in Panama (Denyer and Kusssmaul, 2000). This system changes direction and enters through the center of the country, generating the so-called Central Costa Rica Deformed Belt, which marks the northern border of the Panama microplate. This tectonic framework causes uplifts and deformation in both coasts, as a result of the accumulation of stress and its subsequent release (Norabuena *et al.*, 2004; Protti *et al.*, 2014). The case of the 1991 Limón earthquake is particularly interesting, wherein a coastal uplift oscillating between 30 cm and 1.5 m was recorded (Denyer *et al.*, 1994). Thus, it is necessary to consider corrections related to the deformation effect of the seismic cycle at this location. These corrections were made based on the GNSS station called LIMN.

Regarding the interpretation of the results obtained for the current tide gauge station in Limón, there is an increase in the sea level rise rate when compared against the 1952-1968 period, with the current rate estimated at 4.28 mm/year after correcting for VLM. This is generally consistent with the global increase in this rate, which was estimated to be at 3.7 mm/year between 2006 and 2018 according to the IPCC (2021). Considering the length of the current record (11.6 years analyzed in this research), the two provided values (8.61 mm/year and 4.28 mm/year, without and with correction for VLM, respectively) have a

se estima en 3.7 mm/año entre 2006 y 2018, según IPCC, 2021. Considerando la longitud de registro actual (11.6 años analizados en la presente investigación), los dos valores aportados (8.61 mm/año y 4.28 mm/año, sin y con corrección por el movimiento vertical del terreno, respectivamente) poseen una gran incertidumbre que solo se podrá reducir al aumentar la longitud del registro. Por lo tanto, estos datos presentados no deben utilizarse para la planificación futura del desarrollo urbano de la costa, pero sí como una referencia para confirmar que existe una tendencia al aumento del nivel del mar que debe considerarse al estudiar las transformaciones que están ocurriendo en la costa, como lo son la erosión costera acelerada (Barrantes y Sandoval, 2021) y la afectación por oleajes severos (Barrantes *et al.*, 2020).

Lo anteriormente indicado se sustenta con base en NOAA (2023) que indica que si se dispone de al menos 30 años de datos en una estación mareográfica, el error esperado en el cálculo de la tasa de cambio del nivel del mar es de 1.5 mm/año mientras que si se dispone de 60 años de datos el error esperado se reduce a  $\pm 0.5$  mm/año. Además, se indica que, si el registro es de al menos 20 años de datos, el error esperado es de  $\pm 3.0$  mm/año. Es entonces necesario considerar que la estación mareográfica de Limón, que si bien es cierto operó desde 1948 hasta 1968, tuvo una pérdida de datos de aproximadamente dos años, lo que reduce la longitud de la serie que efectivamente puede analizarse a 16 años. Por otro lado, la estación mareográfica actual en Limón está operando desde 2009; sin embargo, hay una pérdida de datos de aproximadamente año y medio entre 2021 y 2022, lo que provoca que la serie se haya cortado.

En cuanto al impacto del ascenso de nivel del mar en el Caribe costarricense, se debe considerar que la región Huetar Norte, donde se encuentra la costa Caribe, presenta el desempleo abierto más alto del país (11.7%). De sus cantones o municipios costeros, la gran mayoría se encuentran en el quintil más bajo del índice de Desarrollo Humano del país, con excepción de Pococí y Siquirres que se encuentran en el quintil II, esto de acuerdo con datos del Ministerio de Planificación y Política Económica (2023). Aparte de las actividades agroextractivas, como banano y piña, la agricultura de subsistencia, la pesca y con mayor auge actual el turismo, son las principales fuentes de empleo. Destaca también la presencia de importantes áreas costeras protegidas como lo son: el Refugio de Vida Silvestre Barra del Colorado, el Parque Nacional Tortuguero, el Parque Nacional Cahuita y el Refugio Mixto de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo. También se encuentra en esta región la ciudad de Limón, que

high uncertainty that could only be reduced by extending the record length. Therefore, these data should not be used for the coast's future urban development planning but should serve as a reference to confirm that there is a trend of increasing sea level that must be considered when studying the transformations occurring on the coast, such as accelerated coastal erosion (Barrantes and Sandoval, 2021) and the impact of severe wave events (Barrantes *et al.*, 2020).

The above is supported by NOAA (2023), which states that, if at least 30 years of data from a tide gauge station are available, the expected error in calculating the sea level change rate will be  $\pm 1.5$  mm/year, whereas, if 60 years of data are available, the expected error will be reduced to  $\pm 0.5$  mm/year. Furthermore, it is indicated that, if the record includes at least 20 years of data, the expected error will be  $\pm 3.0$  mm/year. It is therefore necessary to consider that, although it did operate from 1948 to 1968, the Limón tide gauge station experienced a data loss of approximately two years, reducing the effective analyzable length of the series to 16 years. On the other hand, the current tide gauge station in Limón has been operating since 2009, but there was a data loss of approximately a year and a half between 2021 and 2022, interrupting the series.

As for the impact of sea level rise on the Costa Rican Caribbean, it should be noted that the Huetar Norte region, where the Caribbean coast is located, has the highest open unemployment rate in the country (11.7%). Most of its coastal cantons or municipalities are in the lowest quintile of the country's Human Development Index, with the exceptions of Pococí and Siquirres (second quintile), according to data from the Ministry of Planning and Economic Policy (2023). Apart from agro-extractive activities (*e.g.*, banana and pineapple), subsistence agriculture, fishing, and – currently booming – tourism are the main sources of employment. The presence of important protected coastal areas is also notable, such as the Barra del Colorado Wildlife Refuge, Tortuguero National Park, Cahuita National Park, and the Gandoca-Manzanillo Mixed Wildlife Refuge. The city of Limón is also located here, which boasts the highest economic development in the region and is home to important commercial and tourist ports.



posee el mayor desarrollo económica de la región y es donde se ubican importantes puertos comerciales y de turismo.

Los autores consideran que el efecto más evidente de la tasa de ascenso del nivel del mar relativo, calculada en + 8.61 mm/año, es en el retroceso de la línea de costa en el Caribe Sur, con tasas entre intensas y severas encontradas en sectores como Cieneguita, Cahuita, Manzanillo y Gandoca (Barrantes y Sandoval, 2021), mientras que la extensión e intensidad de la erosión en el Caribe Norte resulta menor (Barrantes y Ortega, 2023), lo que puede estar asociado a su localización en un margen continental pasivo y por ende podría estar exenta de la subsidencia tectónica, correspondiéndole a esta región (Caribe Norte) una tasa de ascenso de nivel del mar de 4.28 mm/año. La pérdida y disminución de las playas como sucede en Cahuita, Manzanillo y Gandoca (Sandoval y Barrantes, 2021) representa una pérdida de un valioso recurso turístico que puede estar afectando el turismo de sol y playa. Así mismo, en lugares como Cieneguita y Puerto Vargas deja expuesta la infraestructura pública y los establecimientos comerciales y turísticos ante la inundación y sedimentación marina.

El aumento en el nivel del mar ha implicado un aumento en el alcance de los oleajes severos sobre la costa como el ocurrido en 2020 que penetró hasta la zona de restaurantes en Playa Bonita y requirió de la colocación de sacos de arena para proteger la recepción de entrada en playa Cahuita. En el caso de la Ciudad de Limón, sus muros están siendo superados por los oleajes que ahora penetran en la ciudad.

A futuro es preocupante la falta de planificación en la ocupación de la zona costera, ya que se aumenta la exposición acompañada con frecuencia por una alta vulnerabilidad de sus habitantes. Con el cambio climático es de esperar oleajes altos más frecuentes que pueden destruir la infraestructura próxima a la línea de costa como carreteras, sistemas de transmisión de electricidad y agua potable, así como un aumento en la degradación de los ecosistemas costeros que representan una primera línea de defensa, como lo son los arrecifes de coral, la vegetación costera y los manglares, que ya se están siendo afectados.

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos tras analizar los datos históricos del mareógrafo de Limón, para el período de 1952 a 1968. Si bien es cierto este dato no tiene vigencia en la actualidad, es relevante por

The authors believe that the most evident effect of the relative sea level rise rate, calculated as + 8.61 mm/year, is the coastline retreat in the southern Caribbean, with intense to severe rates found in Cieneguita, Cahuita, Manzanillo, and Gandoca (Barrantes and Sandoval, 2021), while the extent and the intensity of the erosion in the northern Caribbean is lower (Barrantes and Ortega, 2023), which may be associated with its location on a passive continental margin, likely exempting it from tectonic subsidence. This region (northern Caribbean) reports a sea level rise rate of 4.28 mm/year. The loss and reduction of beaches, as is the case of Cahuita, Manzanillo, and Gandoca (Sandoval and Barrantes, 2021), represents the loss of a valuable resource, which may be affecting sun and beach tourism. Likewise, in places such as Cieneguita and Puerto Vargas, this phenomenon leaves public infrastructure, as well as commercial and touristic establishments, exposed to flooding and marine sedimentation.

The sea level rise has brought forth an increase in the reach of severe wave events along the coast, such as the one in 2020, which penetrated up to the restaurant area in Playa Bonita and required the placement of sandbags to protect the entrance reception at Cahuita beach. Moreover, the walls of the city of Limón are being overrun by waves that now penetrate into the city.

Regarding the future, the lack of occupation planning in the coastal area is worrying, as exposure often comes with a high vulnerability for residents. In the face of climate change, high waves are more frequently expected, which may destroy the public infrastructure near the coastline, such as roads and electrical and drinking water transmission systems, in addition to increased degradation in the coastal ecosystems that constitute the first line of defense, *i.e.*, coral reefs, coastal vegetation, and mangroves, which have already been affected.

## CONCLUSIONS

This article shows the results obtained after analyzing historical data from the Limón tide gauge station for the 1952-1968 period. Even though these data are not currently valid, they remain relevant as they provide a baseline that allows for comparisons with current values. Regarding the modern tide gauge station, data for the 2009-2021 period were analyzed, obtaining a sea level change rate of 4.28 mm/year after correcting the tide gauge for vertical land motion.

cuando provee una línea base que permite una comparación con el valor actual. Relacionado con la estación mareográfica moderna, se analizaron los datos para el período de 2009 a 2021, obteniéndose como resultado una tasa de cambio del nivel del mar de 4.28 mm/año, esto corrigiendo el valor obtenido en el mareógrafo por el movimiento vertical del terreno.

Se concluye que para la costa Caribe de Costa Rica se ha presentado un incremento de la tasa de cambio del nivel, la cual se ha casi que duplicado, esto tras comparar los resultados de los dos periodos analizados, los cuales están distanciados aproximadamente 50 años. Este incremento, como ha evidenciado otras investigaciones, se puede asociar para explicar los procesos erosivos observados en algunas playas del caribe costarricense. Por ello, es relevante seguir acumulando datos en la estación mareográfica a fin de incrementar la longitud de la serie temporal y mejorar la calidad de los valores estimados.

En cuanto a los métodos aplicados, se considera que el de descomposición de las series temporales es una alternativa para el estudio de series mareográficas, ya que el separar el término de tendencia del término estacional, permite el análisis del primero, sin la influencia del segundo, situación que no ocurre cuando se usa una regresión lineal al conjunto original de datos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Servicio Permanente de Nivel del Mar (PSMSL), al Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis (Sinamot) de la Universidad Nacional (UNA) y al Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC), cuyos datos fueron el punto de partida para realizar la presente investigación.

It is concluded that, in the Caribbean coast of Costa Rica, there has been an increase in the sea level change rate, which has almost doubled. This was found by comparing the results of the two analyzed periods, which are approximately 50 years apart. This increase, as evidenced by other studies, may be associated with the erosive processes observed in some beaches of the Costa Rican Caribbean. Therefore, it is relevant to continue accumulating data in the tide gauge station, in order to increase the length of the time series and improve the quality of the estimated values.

As for the models applied, we believe that the time series decomposition method is an alternative for the study of tide gauge series, as separating the trend term from the seasonal one enables an analysis of the former, without the influence of the latter, which does not occur when applying linear regression to the original dataset.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors would like to thank the Permanent Sea Level Service (PSMSL), the National Tsunami Monitoring System (Sinamot) of Universidad Nacional (UNA), and the Sea Level Center of the University of Hawaii, whose data were the starting point for carrying out this research.

## **BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED**

- Alvarado, G. and G. Cárdenas. 2016. Geology, tectonics, and geomorphology of Costa Rica: A natural history approach. In Kappelle, K. (Ed.) *Costa Rican ecosystems*, Univ. Chicago. 704 p.
- Araújo, A. 2017. As variações do nível do mar em Cascais: um processo em aceleração? XI Congr. Geogr. Port.
- Araújo, M. D. A. 2014. Climate, tectonics and beach erosion: the case of Espinho (NW Portuguese Coast). *Quat. Stud.*, 5 (2008): 39-50.
- Aubrey, D. G., K. O. Emery and E. Uchupi. 1988. Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records. *Tectonophysics*, 154(3-4): 269-284.
- Ballesteros, D. y P. Salazar. 2012. Variabilidad y cambio del nivel del mar en Costa Rica. *Inf. Técn., Lab. Oceanogr. Man. Cost., Univ. Nal. Costa Rica*.
- Barrantes, G. and K. Ortega. 2023. Coastal erosion and accretion on the Caribbean coastline of Costa Rica long-term observations. *J South Am Earth Sci*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104371>



- Barrantes-Castillo, G. y L. F. Sandoval-Murillo. 2021. Cambios en la línea de costa en el Caribe Sur de Costa Rica durante el periodo 2005-2016. *Rev Cienc Ambient.*, 55(2): 105-134.
- Barrantes, G., J. Valverde, D. Paniagua y N. Morales. 2020. Gira de reconocimiento del efecto del oleaje severo ocurrido entre el 13 y 20 de enero de 2020 en el Caribe Sur, Costa Rica. 21 p. *Inf. Progr. Geomorf. Amb., Univ. Nal.*
- Barrantes-Castillo, G., I. Arozarena-Llopis, L.F. Sandoval-Murillo y J. F. Valverde-Calderón. 2020. Playas críticas por erosión costera en el Caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005-2016. *RGE*, 1(64): 95-122. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.4>
- Barros, V. y I. Camilloni. 2020. La Argentina y el cambio climático: de la física a la política. Eudeba. <https://cutt.ly/ZEMyTql>
- Boretti, A. 2019. A realistic expectation of sea level rise in the Mexican Caribbean. *JOES*, 4(4): 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.06.003>
- Church, J. A., D. Monselesan, J. M. Gregory and B. Marzeion. 2013. Evaluating the ability of process-based models to project sea-level change. *Environ. Res. Lett.*, 8(1): 014051.
- Dawahidi, T., D. Ibarra y F. Gomáriz. 2019. Estimación de la subida del nivel del mar por efecto del cambio climático mediante datos de mareógrafos y la serie de satélite NASA Topex-Poseidon/Jason. El caso de Valencia. *An. Geogr. Univ. Complutense*, 39(1): 39-58. doi: <http://dx.doi.org/10.5209/AGUC.64676>
- Denyer, P. y S. Kussmaul (Eds). 2000. *Geología de Costa Rica*. Edit. Tecnol. Costa Rica. 520 p.
- Denyer, P., O. Arias y S. Personius. 1994. Efecto tectónico del terremoto de Limón. *RGE*, 39-52. <https://doi.org/10.15517/RGAC.V0I0.13394>
- Fawzy, S., A. I. Osman, J. Doran and D. W. Rooney. 2020. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 18: 2069-2094.
- Golyandina, N., A. Korobeynikov and A. Zhigljavsky. 2018. *Singular spectrum analysis with R*. Springer. 284 p.
- IMN. 2017. *Clima de Costa Rica: el clima y las regiones climáticas de Costa Rica*. Inst. Meteorol. Nal. <https://www.imn.ac.cr>
- IPCC. 2019. *Sea level rise and implications for low-lying islands, Coasts and Communities — Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>
- IPCC. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. Policymakers, 6. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)
- Jury, M. R. 2018. Puerto Rico sea level trend in regional context. *Oc. Coast. Manag.*, 163: 478-484.
- Khan, N. S., E. Ashe, B. P. Horton, A. Dutton, R. E. Kopp, G. Brocard, S. E. Engelhart, D. F. Hill, W. R. Peltier, C. H. Vane and F. N. Scatena. 2017. Drivers of Holocene sea-level change in the Caribbean. *Quat. Sci. Rev.*, 155: 13-36. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.032>
- Lizano, G. 2006. Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *RECyT*, 24: 51-64.
- Lizano, O. 2009. Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica, parte 1. *RECyT*, 25: 43-56.
- Lizano, O. 2013. Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la isla del Coco. *InterSedes*, 14(27): 6-27.
- Lizano, O. y A. Gutiérrez. 2011. Erosión en las costas de Costa Rica, un problema de todos. *Ent. Prev.*, 7: 14-16.
- Masselink, G. and R. Gehrels. 2015. Introduction to coastal environments and global change. *Coast. Environ. Glob. Change*, 1-27.
- Mideplan. 2023. *Índice de Desarrollo Social 2023*. Informe final, MIDEPLAN, San Jose. 218 p.
- Mohamed, B., A. Mohamed, K. A. El-Din, H. Nagy and A. Elsherbiny. 2019. Sea level changes and vertical land motion from altimetry and tide gauges in the Southern Levantine Basin. *J. Geodyn.*, 128: 1-10.
- NOAA. What is sea level?. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/faq.html#q4>
- Norabuena, E., T. H. Dixon, S. Schwartz, H. DeShon, A. Newman, M. Protti, V. González, L. Dorman, E. R. Flueh and P. Lundgren. 2004. Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 109(B11).
- Pabón, J. D. y J. A. Lozano. 2005. Aspectos relacionados con las estimaciones globales y regionales del ascenso del nivel del mar, y su aplicación a Colombia. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, 14: 97-106.
- Palanisamy, H., M. Becker, B. Meyssignac, O. Henry and A. Cazenave. 2012. Regional sea level change and variability in the Caribbean Sea since 1950. *J. Geod. Sci.*, 2(2): 125-133.
- Pons Valls, J.M. 2009. La medición del nivel medio del mar: principios y métodos. *Mapping*, 135: 6-10.
- Protti, M., V. González, A. V. Newman, T. H. Dixon, S. Y. Schwartz, J. S. Marshall, L. Feng, J. I. Walter, R. Malservisi and S. E. Owen, 2014. Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nat. Geosci.*, 7(2): 117-121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>

- Sandoval, L. y G. Barrantes. 2021. Cambios en la cobertura de la tierra en los puntos calientes de erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005 – 2017. *Uniciencia*, 35(2). <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.6>
- Shaftel, H. 2021. Overview: Weather, global warming and climate change. *Climate change: Vital signs of the planet*. <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/>
- Torres, R. R. and M. N. Tsimplis. 2013. Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *J Geophys. Res. Oceans.*, 118(6): 2934-2947.
- Torres-Parra, R. R., J. C. Gómez-López y F. Afanador-Franco. 2006. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 24: 64-72
- Vignudelli, S., F. Birol, J. Benveniste, L. L. Fu, N. Picot, M. Raynal and H. Roinard. 2019. Satellite altimetry measurements of sea level in the coastal zone. *Surveys in Geophysics*, 40, 1319-1349.
- Wong, P. P., I. J. Losada, J. P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. L. McInnes and A. Sallenger. 2014. Coastal systems and low-lying areas. *Clim. Change*, 2104: 361-409.

**RECIBIDO / RECEIVED:** 29/01/2024

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 24/04/2024



## Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia

### Vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socio-ecosystem in Colombia

Julio César Herrera Carmona<sup>1,2\*</sup>, Johanna Prüssmann Uribe<sup>1</sup>, Melissa Abud Hoyos<sup>1</sup> y Luis Alonso Zapata Padilla<sup>1</sup>

0000-0003-0446-3275

0009-0006-0700-5949

0000-0001-5055-5256

1. Fondo Mundial para la Naturaleza Colombia-WWF Colombia, Cali, Colombia

2. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

julio.cesar.herrera@correounivalle.edu.co\*, jprussmann@wwf.org.co, mabud@wwf.org.co, lazapata@wwf.org.co

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Los manglares están expuestos a amenazas como el aumento del nivel del mar, la erosión costera, el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos, además de presiones socioeconómicas. Este estudio tuvo como objetivo realizar un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para el socioecosistema de manglar de Colombia. Se utilizaron 22 indicadores de amenaza, 8 de sensibilidad y 18 de capacidad adaptativa; mediante un análisis numérico multivariado se generaron los índices de vulnerabilidad y riesgo climático para los manglares del Pacífico y del Caribe de Colombia. Los manglares que presentaron mayor riesgo en el Caribe se ubicaron en los municipios de Manaure, Tubará y Puerto Escondido, mientras que en el Pacífico estas áreas de alto riesgo se ubicaron en la costa sur, en los municipios de Olaya Herrera, Francisco Pizarro y La Tola, y en la costa norte de Bahía Solano. Los indicadores de amenaza que capturaron la mayor variabilidad del análisis fueron: el aumento del nivel del mar, el cambio en la línea de costa, el cambio en la oferta hídrica, el cambio en la cobertura de manglares por cambio en la línea de costa, el cambio en la temperatura y la precipitación debido a El Niño y La Niña, y la huella humana. Estos resultados son un insumo para la gestión climática de los manglares en Colombia y contribuirán al Programa Nacional de Manglares. Asimismo, podrán contribuir al Plan Nacional de Restauración de Manglares, la Contribución Nacionalmente Determinada de Colombia (NDC), la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia E2050, y los Planes Territoriales de Adaptación al Cambio Climático de los departamentos y municipios.

**PALABRAS CLAVE:** Cambio climático, Pacífico de Colombia, Caribe de Colombia, amenazas, adaptación.

#### ABSTRACT

The mangroves are exposed to threats such as sea level rise, coastal erosion, increase in the frequency and intensity of extreme events, in addition to socioeconomic pressures. This study aimed to carry out a vulnerability and risk climate analysis for the Colombian mangrove socioecosystem. 22 threat indicators, eight of sensitivity and 18 of adaptive capacity were used, and through multivariate numerical analysis, the vulnerability and climate risk indices for Colombian Pacific and Caribbean mangroves were generated. The mangroves that presented the highest risk in the Caribbean were located in the Manaure, Tubará and, Puerto Escondido municipalities, while in the Pacific these high-risk areas were located on the southern coast in the Olaya Herrera, Francisco Pizarro, and La Tola municipalities, and in the northern coast in the Bahía Solano municipality. The threat indicators that captured the greatest variability in the analysis were: sea level rise, change in the coastline, change in water supply, change in mangrove coverage due to change in the coastline, change in temperature and precipitation due to El Niño and La Niña, and human footprint. These results are input for climate management of mangroves in Colombia and will contribute to the National Mangrove Program. Likewise, it can contribute to the National Mangrove Restoration Plan, the Nationally Determined Contribution of Colombia (NDC), the Long-Term Climate Strategy of Colombia E 2050, and the Territorial Plans for Climate Change Adaptation of the states and municipalities.

**KEYWORDS:** Climate change, Colombian Pacific, Colombian Caribbean, threats, adaptation.

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1308>

Publicado por Invemar

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by Invemar

This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

## INTRODUCCIÓN

Los manglares son un ecosistema intermareal distribuido a lo largo de las costas tropicales y subtropicales del mundo, que proveen un amplio rango de servicios ecosistémicos (Giri *et al.*, 2011; Bunting *et al.*, 2022). Estos no se encuentran aislados, sino que está fuertemente relacionados con las dinámicas sociales y culturales de las comunidades locales, por lo que son considerados sistemas socio ecológicos o socioecosistemas (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2021). Además de ser importantes escenarios con altos niveles de biodiversidad, los manglares estabilizan la línea de costa, reducen la erosión, promueven el mantenimiento de la biodiversidad, capturan carbono y protegen a las comunidades costeras, ya que pueden incrementar su capacidad adaptativa y pueden hacerlas más resilientes a los impactos del cambio climático (Spalding *et al.*, 2014). Los manglares también ayudan a mantener la seguridad alimentaria de las comunidades locales, ya que proveen hogar y sitios de reproducción para organismos marinos como peces, moluscos, cangrejos y camarones (Sandilyan y Kathiresan, 2012). El complejo hábitat tridimensional que crean los manglares sostiene la producción de pesquerías artesanales e industriales que son fuente de proteína e ingresos para las comunidades costeras (Unep-Nairobi Convention/Usaid/Wiomsa, 2020).

Además de las amenazas humanas que enfrenta el socioecosistema de manglar, entre las que se encuentran la sobreexplotación del bosque, la conversión de coberturas por actividades de gran escala como la agricultura, silvicultura, desarrollo humano e infraestructura, desviación de agua para irrigación, el establecimiento de estanques para acuicultura y expansión urbana, los manglares también están amenazados por el impacto del cambio climático (Ward *et al.*, 2016; Worthington *et al.* 2020). Entre los impactos del cambio climático que están afectando los manglares y exacerbando los impactos directos, se encuentran los cambios en temperatura, precipitación, incremento de tormentas, tasas de sedimentación y erosión costera, suministro de agua, incremento de patógenos e incremento en el nivel del mar (Alongi, 2015; Leal y Spalding, 2022).

Los bosques de manglar de Colombia cuentan con importantes reservorios de carbono (Leal y Spalding, 2022), con extensas coberturas en el Parque Nacional Natural Sanquianga (80000 ha de manglar), el cual está localizado en la región Pacífico, y alberga la más extensa área de manglar del país y de Suramérica (Parques Nacionales Naturales, 2018). Además de las amplias coberturas y del buen estado de conservación de los

## INTRODUCTION

Mangroves are intertidal ecosystems distributed along the tropical and subtropical coasts of the world, providing a wide range of ecosystem services (Giri *et al.*, 2011; Bunting *et al.*, 2022). These ecosystems are not isolated; they are strongly linked to the social and cultural dynamics of local communities, and are therefore regarded as socio-ecological systems, or socioecosystems (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2021). In addition to being important settings with high levels of biodiversity, mangroves stabilize the coastline, reduce erosion, aid in maintaining biodiversity, capture carbon, and protect coastal communities, increasing their adaptive capacity and making them more resilient to the impacts of climate change (Spalding *et al.*, 2014). Mangroves also help to maintain the food security of local communities, as they provide living and breeding sites for marine organisms such as fish, mollusks, crabs, and shrimp (Sandilyan and Kathiresan, 2012). The complex three-dimensional habitat created by mangroves supports the production of both artisanal and industrial fisheries, which are sources of protein and income for coastal communities (Unep-Nairobi Convention/Usaid/Wiomsa, 2020).

In addition to the anthropic threats faced by mangrove socioecosystems (which include forest overexploitation; land cover conversion for large-scale activities such as agriculture, forestry, human development, and infrastructure; water diversion for irrigation; the establishment of aquaculture ponds; and urban expansion), mangroves are also threatened by the impact of climate change (Ward *et al.*, 2016; Worthington *et al.*, 2020). Among the impacts of climate change that affect mangroves and exacerbate other direct impacts are changes in temperature and precipitation; increased storm frequency, sedimentation rates, and coastal erosion; water supply issues; increased pathogens; and rising sea levels (Alongi, 2015; Leal and Spalding, 2022).

Colombia's mangrove forests contain significant carbon reserves (Leal and Spalding, 2022), with extensive coverages in the Sanquianga National Natural Park (80000 ha of mangrove), which is located in the Pacific region and features the largest mangrove area in the country and South America (Parques Nacionales Naturales, 2018). In addition to the extensive coverage and good conservation status of the mangroves of the Colombian Pacific (Spalding *et al.*, 2007), which have been described as the most luxuriant and wet on the continent (West, 1956), the tallest mangroves in



manglares del Pacífico de Colombia (Spalding *et al.*, 2007), los cuales han sido descritos como los más exuberantes y húmedos del continente americano (West, 1956), es posible encontrar en esta región los manglares más altos de América (Castellanos *et al.*, 2021) y del mundo (Simard *et al.*, 2023). En el Caribe de Colombia, la mayor extensión de manglar se asocia al sistema del delta del río Magdalena y la Ciénaga Grande de Santa Marta (39899 ha) (Rodríguez-Rodríguez *et al.* 2018). Es de resaltar el marcado contraste que hay entre las regiones biogeográficas del Pacífico y del Caribe de Colombia, en relación con las presiones y amenazas, principalmente las asociadas a cambios en el uso de la tierra, extracción de recursos, erosión costera y urbanización (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018; Blanco-Libreros y Ramírez-Ruíz, 2021), siendo la región del Caribe la que presenta mayores amenazas.

De acuerdo con Murillo-Sandoval *et al.* (2022), durante el período 1984 - 2000 las coberturas de manglar en Colombia disminuyeron un 14 % (48000 ha). A lo largo del Pacífico, la disminución se dio desde 2004, mientras que en el Caribe las coberturas de manglar disminuyeron entre 1984 - 1988 y después de 2012. Sin embargo, en este trabajo los únicos motores de cambio identificados estuvieron asociados a actividades humanas como la expansión agrícola y la construcción de carreteras, dejando de un lado factores asociados a los impactos del cambio del climático o de la variabilidad climática, como la erosión costera generada por el ascenso en el nivel del mar.

En Colombia los manglares no son sistemas aislados, ya que son el hogar de comunidades negras e indígenas, pescadores sin una asociación étnica en particular y de una gran cantidad de habitantes asociados a los manglares urbanos (Blanco-Libreros y Ramírez-Ruíz, 2021), de los que dependen en gran medida su seguridad alimentaria, ya que una característica común entre estas comunidades es el bajo nivel e ingresos y la capacidad limitada para adquirir bienes y servicios. Esta condición puede ser exacerbada por los impactos asociados al cambio climático. Aunque algunos trabajos han abordado la problemática de la degradación de los socioecosistemas de manglar por efectos antrópicos en Colombia (Botero y Salzwedel, 1999; Garcés-Ordoñez y Bayona, 2019; Garcés-Ordoñez *et al.*, 2023), y estos asumen que ese tipo de presiones pueden exacerbar los efectos adversos del cambio climático, estos no se enfocan en los impactos que pueden tener el cambio climático en el socioecosistema de manglar.

El carácter y la gravedad de los impactos por cambio climático no dependen sólo de las amenazas, que se espera

América (Castellanos *et al.*, 2021) and the world (Simard *et al.*, 2023) can be found in this region. In the Colombian Caribbean, the largest mangrove extension is associated with the Magdalena River delta system and the Ciénaga Grande de Santa Marta (39899 ha) (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018). It is worth highlighting the marked contrast between Colombia's Pacific and Caribbean biogeographical regions in terms of pressures and threats, mainly regarding those associated with changes in land use, resource extraction, coastal erosion, and urbanization (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018; Blanco-Libreros and Ramírez-Ruíz, 2021), with the Caribbean region facing greater threats.

According to Murillo-Sandoval *et al.* (2022), over the 1984 - 2000 period, mangrove cover in Colombia decreased by 14 % (48000 ha). In the Pacific, the decline started in 2004, while, in the Caribbean, mangrove cover decreased between 1984 and 1988 and after 2012. However, the only drivers of change identified in this work were associated with human activities such as agricultural expansion and road construction, leaving aside factors related to the impacts of climate change or climate variability, such as coastal erosion generated by rising sea levels.

In Colombia, mangroves are not isolated systems, as they are home to Agrocolombian and Amerindian, to fishermen without a specific ethnic association, and to a large number of residents associated with urban mangroves (Blanco-Libreros and Ramírez-Ruíz, 2021), whose food security largely depends on these systems, since a low income level and a limited capacity to acquire goods and services are among the common characteristics of these communities. These conditions can be exacerbated by the impacts associated with climate change. Although some studies have addressed the issue of mangrove socioecosystem degradation due to anthropogenic effects in Colombia (Botero and Salzwedel, 1999; Garcés-Ordoñez and Bayona, 2019; Garcés-Ordoñez *et al.*, 2023), assuming that such pressures can exacerbate the adverse effects of climate change, they do not focus on the impacts of climate change on mangrove socioecosystems.

The character and severity of climate change impacts depend not only on the threats, which are expected to intensify in future scenarios, but also involve exposure variables and the system's vulnerability to climate change (IPCC, 2022). Generally, exposure is a determining factor of risk, specific to the threat of climate change, whereas vulnerability results from a broad range of factors, such as socioeconomic conditions in the case of human systems,

se vean intensificadas en los escenarios futuros, sino también involucra las variables de exposición y la vulnerabilidad al cambio climático del sistema (IPCC, 2022). La exposición es generalmente un factor determinante del riesgo, siendo específico de la amenaza por cambio climático, mientras la vulnerabilidad resulta de una amplia gama de factores, como las condiciones socioeconómicas en el caso de los sistemas humanos, en donde se relacionan sensibilidad y capacidad adaptativa como variables. Desde el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014), se ha hecho énfasis en el manejo del riesgo climático, para facilitar la identificación de las estrategias de manejo necesarias en un contexto de incertidumbre agravado por el cambio climático. Este enfoque tiene la virtud de facilitar la comprensión del público y de los tomadores de decisión sobre las medidas que deben adoptar con relación al cambio climático (Ideam *et al.*, 2017).

Es necesario que los socioecosistemas de manglar del país se mantengan en un estado saludable que permita contribuir a las estrategias climáticas globales y nacionales, y a las metas de desarrollo sostenible, para que así jueguen un papel fundamental en la mitigación del cambio climático con el almacenamiento de carbono, salvaguarden la biodiversidad, reduzcan el riesgo de desastres y mantengan niveles de resiliencia óptimos para enfrentar el rápido calentamiento global. Los compromisos que tiene el país en materia de clima (mitigación y adaptación) no son ajenos a los manglares, ya que las metas de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC), incluyen soluciones basadas en la naturaleza para la protección del manglar y para su restauración, lo cual permitirá que el país avance en la gestión del cambio climático.

Dado que los impactos del cambio climático y la variabilidad climática pueden poner en riesgo el socioecosistema de manglar, los servicios ecosistémicos y los beneficios que proveen a las comunidades, los cuales son exacerbados por las presiones socioeconómicas, este trabajo busca realizar un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para los manglares de Colombia. El objetivo fue identificar las amenazas climáticas y condiciones de vulnerabilidad que definen el grado de riesgo del socioecosistema de manglar bajo condiciones de clima cambiante en el Pacífico y el Caribe colombianos, para así poder identificar las estrategias de adaptación y manejo adecuadas. Estos resultados constituyen una línea base para los instrumentos de política pública del país y para los planes territoriales de adaptación al cambio climático de los departamentos y los municipios, entre otros instrumentos de política pública.

where the variables of sensitivity and adaptive capacity are related. Since the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), climate risk management has been emphasized in order to facilitate the identification of necessary management strategies within a context of uncertainty intensified by climate change. This approach has the virtue of facilitating the understanding of the public and decision-makers about the measures to be adopted regarding climate change (Ideam *et al.*, 2017).

It is necessary for the country's mangrove socioecosystems to remain in a healthy state that allows contributing to global and national climate strategies and the sustainable development goals, so that they play a fundamental role in mitigating climate change through carbon storage while safeguarding biodiversity, reducing the risk of disasters, and maintaining optimal resilience levels to face rapid global warming. The country's commitments in terms of climate (mitigation and adaptation) do not exclude mangroves, as the goals of the Nationally Determined Contribution (NDC) include nature-based solutions for the protection of these ecosystems and their restoration, allowing the country to advance in climate change management.

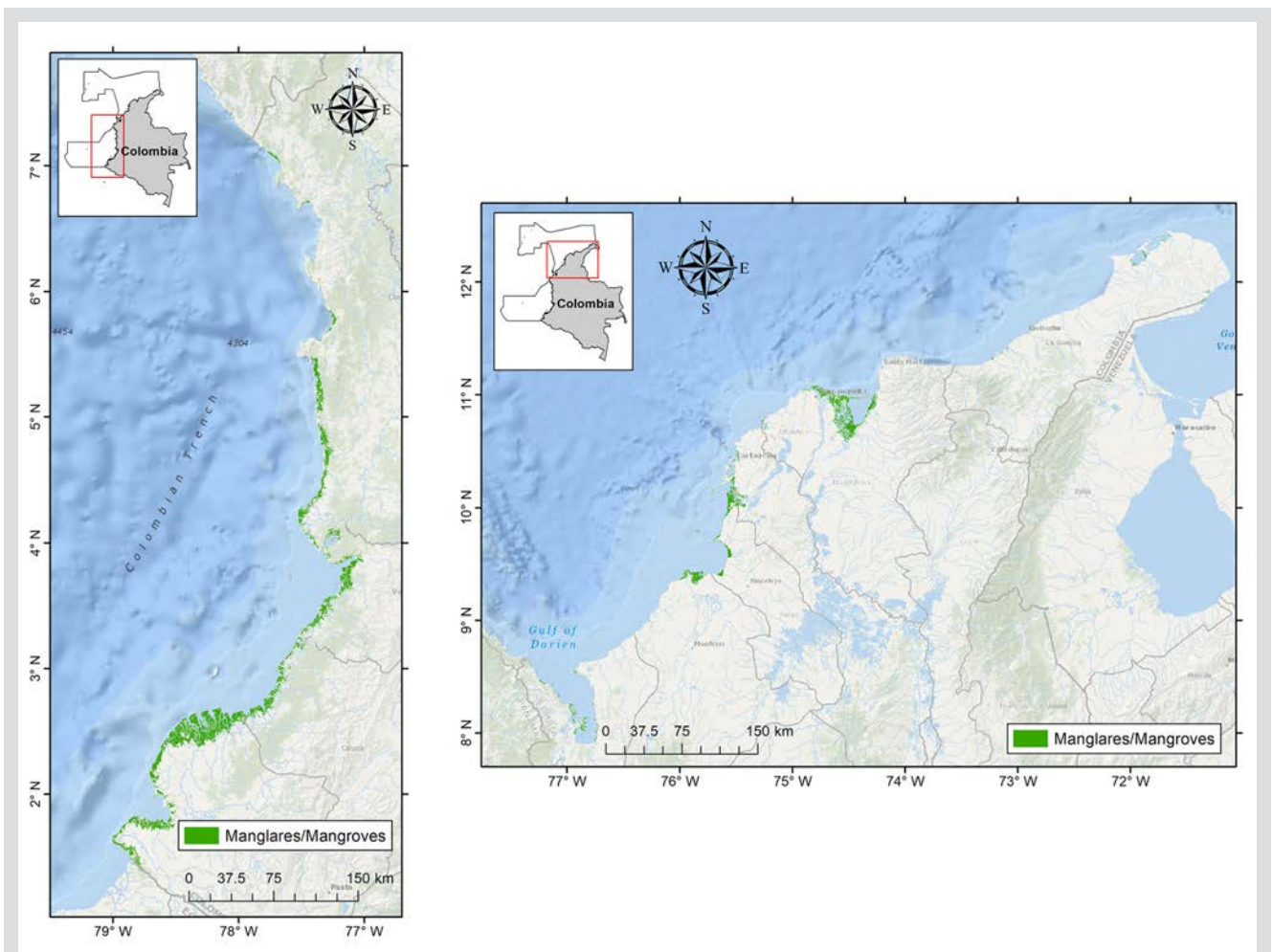
Given that the impacts of climate change and climate variability can endanger mangrove socioecosystems and the ecosystem services and benefits they provide to communities, which is exacerbated by socioeconomic pressures, this work seeks to conduct a vulnerability and climate risk analysis for the mangroves of Colombia. The objective is to identify climate threats and vulnerability conditions to define the risk level of the mangrove socioecosystem under changing climate conditions in the Colombian Pacific and Caribbean, in order to identify adequate adaptation and management strategies. These results constitute a baseline for the country's public policy instruments and, among others, for the territorial climate change adaptation plans of departments and municipalities.

## ÁREA DE ESTUDIO

Colombia está localizado al norte de Suramérica y cuenta con costas en el océano Pacífico y el mar Caribe. En el país hay alrededor de 280 000 ha de manglar de las cuales 71 % se encuentran en el Pacífico y 29 % en el litoral Caribe, incluyendo los de la región insular oceánica de San Andrés y Providencia (<https://geovisorsigma.invemar.org.co/>) (Figura 1). El Pacífico de Colombia incluye las selvas húmedas de las tierras bajas del Complejo Ecorregional Chocó-Darién (CECH) (Olson y Dinerstein, 2002), el cual es una de las regiones del mundo con la más alta precipitación (Poveda y Mesa, 2000). Debido al doble paso de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) en la zona centro y norte predomina un ciclo de precipitación anual bimodal (Poveda *et al.*, 2007), mientras que hacia los extremos latitudinales (Ecuador y Panamá), es unimodal.

## STUDY AREA

Colombia is located in the north of South America and has coasts along the Pacific Ocean and the Caribbean Sea. In the country, there are approximately 280 000 ha of mangroves, out of which 71 % are in the Pacific and 29 % are along the Caribbean coast, including those in the oceanic insular region of San Andrés and Providencia (<https://geovisorsigma.invemar.org.co/>) (Figure 1). The Colombian Pacific includes the moist lowland forests of the Chocó-Darién Ecoregional Complex (CECH) (Olson and Dinerstein, 2002), one of the regions with the highest precipitation in the world (Poveda and Mesa, 2000). Due to the double passage of the Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ), a bimodal annual precipitation cycle predominates in the central and northern areas (Poveda *et al.*, 2007). Meanwhile, towards the latitudinal extremes (Ecuador and Panama), this cycle is unimodal. In the bimodal



**Figura 1.** Área de estudio, y coberturas de manglar del Pacífico y del Caribe de Colombia. Las coberturas de manglar asociadas a la zona insular de San Andrés y Providencia no se encuentran en el mapa, debido a que no fueron incluidas en los análisis por vacíos de información.

**Figure 1.** Study area and mangrove cover of the Colombian Pacific and Caribbean. The mangrove cover associated with the insular zone of San Andrés and Providencia is not shown on the map, as it was not included the analyses due to information gaps.

En el ciclo bimodal los máximos de precipitación ocurren entre abril-mayo, y octubre-noviembre; y los mínimos entre diciembre-febrero, y junio-agosto (Poveda *et al.*, 2006). La variabilidad interanual asociada al ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es otro ciclo importante en la región, el cual presenta una amplitud similar al ciclo anual (Fiedler y Talley, 2006). En el Caribe de Colombia el régimen climático es marcadamente bimodal con períodos lluviosos (agosto-noviembre) y secos (diciembre-febrero) interrumpidos por un período de transición (marzo-julio). A diferencia del Pacífico, donde la amplitud de marea puede llegar hasta cuatro metros, en el Caribe hay micromareas con una amplitud menor a 0.5 m. Así mismo hay unas marcadas diferencias en la estructura de los manglares entre el Pacífico y el Caribe, ya que estos últimos están menos desarrollados que los de la costa del Pacífico (Invemar, 2013).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis siguió la definición de vulnerabilidad y riesgo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2022), donde la vulnerabilidad está en función de la sensibilidad y la capacidad adaptativa, y el riesgo está en función de la amenaza y la vulnerabilidad. Dado que el socioecosistema de manglar en Colombia no se encuentra aislado, sino que está fuertemente relacionado con las dinámicas sociales y culturales de las comunidades locales, se consideró al manglar como un socioecosistema con dos componentes para los cuales fueron identificados diferentes indicadores: el ecosistema de manglar y su biodiversidad, y las comunidades humanas asociadas al manglar y sus medios de vida.

El análisis de vulnerabilidad y riesgo se realizó para 46 municipios costeros de los dos litorales de Colombia con cobertura de manglar de acuerdo al Sistema de Información para la Gestión de los Manglares en Colombia (SigmaV8) (<https://geovisorsigma.invemar.org.co/>). En total se incluyeron en los análisis 30 municipios para el Caribe y 16 para el Pacífico. Aunque en el Caribe de Colombia se encuentran siete municipios con cobertura de manglar pero sin zona costera, estos no fueron incluidos en el análisis debido a que no contaban con los indicadores asociados a la zona litoral y oceánica de todas las unidades de análisis (*e.g.* cambio en la línea de costa, cambio de la temperatura superficial del mar, entre otros). Tampoco se incluyeron los manglares de San Andrés y Providencia, debido a que estos municipios no contaban con muchos de los indicadores socioeconómicos de las otras unidades.

cycle, maximum precipitation occurs between April and May and between October and November, and the minimum values are observed between December and February and between June and August (Poveda *et al.*, 2006). The interannual variability associated with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) is another significant cycle in the region, exhibiting an amplitude similar to that of the annual cycle (Fiedler and Talley, 2006). In the Colombian Caribbean, the climate regime is distinctly bimodal, with rainy (August-November) and dry periods (December-February) interrupted by a transition period (March-July). Unlike the Pacific, where the tidal range can reach up to four meters, in the Caribbean, there are microtides with an amplitude of less than 0.5 m. Moreover, there are marked differences in mangrove structure between the Pacific and the Caribbean, as the latter are less developed than those on the Pacific coast (Invemar, 2013).

## MATERIALS AND METHODS

The analysis followed the Intergovernmental Panel on Climate Change's definition of *vulnerability* and *risk* (IPCC, 2022), where the former is a function of sensitivity and adaptive capacity, and the latter is a function of threat and vulnerability. Given that mangrove socioecosystems in Colombia are not isolated but strongly connected with the social and cultural dynamics of local communities, they were considered as a socioecosystem with two components, for which different indicators were identified. These components are the mangrove ecosystem and its biodiversity, and the human communities associated with mangroves and their livelihoods.

The vulnerability and risk analysis was conducted for 46 coastal municipalities with mangrove cover in the two littorals of Colombia, according to the Information System for the Management of Mangroves in Colombia (SigmaV8) (<https://geovisorsigma.invemar.org.co/>). In total, 30 municipalities in the Caribbean and 16 in the Pacific were included in the analysis. Although there are seven municipalities in the Colombian Caribbean with mangrove coverage but no coastal zone, these were not included in the analysis because they did not report the indicators associated with the coastal and oceanic zone of all analysis units (*e.g.*, changes in the coastline and changes in sea surface temperature, among others). The mangroves in San Andrés and Providencia were also excluded, because these municipalities did not have many of the socioeconomic indicators of the other units.

Después de un análisis interdisciplinario (equipos de gobernanza, biodiversidad y cambio climático de WWF Colombia), se priorizaron diferentes indicadores para amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa. En todos los casos se usaron fuentes de información oficiales y/o de entidades del estado. Se utilizaron 22 indicadores de amenaza (Tabla 1), ocho de sensibilidad (Tabla 2) y 18 indicadores de capacidad adaptativa (Tabla 3). La asignación de indicadores en cada dimensión (amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa) se realizó de acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) (Ideam *et al.*, 2017).

After an interdisciplinary analysis (involving governance, biodiversity, and climate change teams at WWF Colombia), different indicators regarding threats, sensitivity, and adaptive capacity were prioritized. In all cases, official information sources and/or data from state entities were used. 22 threat indicators (Table 1), eight sensitivity indicators (Table 2), and 18 adaptive capacity indicators (Table 3) were employed. The indicators in each dimension (threat, sensitivity and adaptive capacity) were assigned according to the Third National Communication on Climate Change (TCNCC) (Ideam *et al.*, 2017).

**Tabla 1.** Indicadores de amenaza usados en el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar.

**Table 1.** Threat indicators used in the vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socioecosystem

Indicador / Indicator	Fuente / Sources
Huella humana / Human footprint	Instituto Humboldt (Correa <i>et al.</i> , 2020) / Humboldt Institute (Correa <i>et al.</i> , 2020)
Cambio en la oferta hídrica por cambio climático / Change in the water supply due to climate change	Estudio Nacional del Agua (Ideam, 2019) / National Water Study (Ideam, 2019)
Pérdida de área idónea de especies amenazadas / Loss of suitable area for threatened species	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Cambio en la cobertura de manglar por cambio en la línea de costa (CLC) al 2040 / Change in mangrove cover due to coastline changes (CLC) as of 2040	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Cambio en la cobertura de manglar por ascenso en el nivel del mar ANM / Change in mangrove cover due to sea level rise (ANM)	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Pérdida de área idónea para especies de manglar / Loss of suitable area for mangrove species	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Porcentaje de población afectada por inundación causada por ANM / Percentage of the population affected by flooding due to ANM	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Cambio % precipitación (2040) / Changes in the % precipitation (2040)	Análisis propio a partir de los GCM de WorldClim/ Own analysis based on the WorldClim GCM (Fick y Hijmans, 2017)
Cambio de temperatura (2040) / Temperature change (2040)	Análisis propio a partir de los GCM de WorldClim/ Own analysis based on the WorldClim GCM (Fick y Hijmans, 2017)
Ascenso Nivel del Mar 2040 (ha) / Sea level rise, 2040 (ha)	TCNCC (INVEMAR, 2017)
Cambio en línea de costa (CLC) 2040 (ha) / Coastline change (CLC) 2040 (ha)	TCNCC (INVEMAR, 2017)
Cambio TSM-RCP60 - 2040 / Change in TSM-RCP60 - 2040	TCNCC (INVEMAR, 2017)
Cambio de temperatura durante El Niño / Temperature change during El Niño	Series de tiempo Ideam (análisis propio) / Ideam time series (own analysis)
Cambio de temperatura durante La Niña / Temperature change during La Niña	Series de tiempo Ideam (análisis propio) / Ideam time series (own analysis)
Cambio % de precipitación durante El Niño / Change in the % precipitation during El Niño	Series de tiempo Ideam (análisis propio) / Ideam time series (own analysis)

Indicador / Indicator	Fuente / Sources
Cambio % de precipitación durante La Niña / Change in the % precipitation during La Niña	Series de tiempo Ideam (análisis propio) / Ideam time series (own analysis)
Porcentaje del área de la entidad territorial amenazada por fenómenos hidrometeorológicos / Percentage of the territorial entity's area that is threatened by hydrometeorological phenomena	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Cambio % territorios artificializados por ANM 2040 / Change in the % of artificialized territories due to ANM, 2040	Análisis propio / Own analysis (Corine Land Cover 2017 vs. Invemar, 2017)
Cambio % territorios agrícolas por ANM 2040 / Change in the % of agricultural territories due to ANM, 2040	Análisis propio / Own analysis (Corine Land Cover 2017 vs. Invemar, 2017)
Cambio % bosques y áreas seminaturales por ANM 2040 / Change in the % of forests and seminatural areas due to ANM, 2040	Análisis propio / Own analysis (Corine Land Cover 2017 vs. Invemar, 2017)
Cambio % áreas húmedas por ANM 2040 / Change in the % of wet areas due to ANM, 2040	Análisis propio / Own analysis (Corine Land Cover 2017 vs. Invemar, 2017)
Cambio % superficies de agua por ANM 2040 / Change in the % of water surfaces due to ANM, 2040	Análisis propio / Own analysis (Corine Land Cover 2017 vs. Invemar, 2017)

Dado que los escenarios de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) (Ideam *et al.*, 2017) se encuentran disponibles en formato vectorial y categorizados por rangos, estos no capturan adecuadamente la variabilidad de los cambios de temperatura y precipitación en los escenarios futuros. Adicionalmente, la TCNCC generó los escenarios con modelos multiensamble de los RCP (trayectorias de concentración representativas) y de los GCM (Modelos de Circulación Global), lo cual no es adecuado ya que además de mezclar la incertidumbre asociada a los GCM, no permite diferenciar las diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, fue necesario modelar los escenarios futuros de precipitación y temperatura para Colombia, a partir de los GCM del proyecto CMIP5, los cuales están disponibles en la plataforma WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) (Fick y Hijmans, 2017). Los GCM del proyecto CMIP5 utilizados fueron los de mejor ajuste para Colombia de acuerdo con Arias *et al.* (2021). El escenario empleado fue el RCP 6.0 para el período 2040. Los cambios porcentuales de precipitación y el delta de temperatura fueron calculados en relación con el período de referencia 1970 - 2000 (Fick y Hijmans, 2017) (Tabla 1).

Los cambios porcentuales de precipitación y temperatura promedio durante eventos El Niño y La Niña (Tabla 1) fueron calculados con las series de tiempo de la normal climatológica de Ideam 1980 - 2010, para 307 estaciones de todo el territorio nacional. Las series de tiempo fueron obtenidas del sitio web del Ideam (<http://dhime>).

Given that the scenarios of the Third National Communication on Climate Change (TCNCC) (Ideam *et al.*, 2017) are available in vector format and are categorized by ranges, they do not adequately capture the variability of temperature and precipitation changes in future scenarios. Additionally, the TCNCC generated scenarios using multi-model ensembles of RCP (representative concentration pathways) and GCM (global circulation models), which is not suitable since, in addition to mixing the uncertainty associated with the GCM, it does not allow differentiating between the various greenhouse gas concentration trajectories. Therefore, it was necessary to model future scenarios regarding precipitation and temperature in Colombia by using the GCM of the CMIP5 project, which are available on the WorldClim platform (<https://www.worldclim.org/>) (Fick and Hijmans, 2017). The CMIP5 project GCM used were those best fitted for Colombia according to Arias *et al.* (2021). The scenario employed was RCP 6.0 for the 2040 period. The percent changes in precipitation and temperature delta were calculated relative to the 1970 - 2000 reference period (Fick and Hijmans, 2017) (Table 1).

The percent average precipitation and temperature changes during El Niño and La Niña events (Table 1) were calculated using the climatological normal time series from Ideam 1980 - 2010 for 307 stations across the national territory. The time series were obtained from the Ideam website (<http://dhime.Ideam.gov.co>). The definition of an



Ideam.gov.co). La definición de un período ENOS (El Niño Oscilación del Sur) se ajustó a la denominación operacional de El Niño/La Niña bajo el índice ONI de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA), la cual estableció que estos eventos son definidos como “un fenómeno en el Pacífico ecuatorial caracterizado por un incremento/disminución de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) respecto al período base, en la región Niño 3.4, y más grande o igual en magnitud a (+/-) 0.5 °C, promediado por un período de tres meses consecutivos, y sostenido por cinco períodos” (Larkin y Harrison, 2005). Cuando el índice ONI estuvo en su fase cálida se identificó un período El Niño (EN), mientras que cuando el índice ONI estuvo en su fase fría se identificó un período La Niña (LN). Los periodos restantes fueron considerados neutros, y usados como referencia de línea base para calcular los cambios porcentuales de precipitación y temperatura durante cada evento (EN/LN).

El cambio porcentual de coberturas de la tierra (territorios artificializados y agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas, y superficies de agua) (Tabla 1), fue estimado mediante el cruce de capas de las coberturas de la tierra de Colombia 2017 a escala 1:25.000 (<https://siac-datosabiertos-mads.hub.arcgis.com>), con el incremento proyectado del ascenso en el nivel del mar al 2040 (Invemar, 2017). El índice de huella humana (Tabla 1) fue usado como indicador de impacto antropogénico. Este fue calculado por Correa *et al.* (2020) considerando el uso de la tierra, la densidad de la población rural, la distancia a carreteras, la distancia a asentamientos urbanos, el índice de fragmentación, el índice de biomasa en relación a la biomasa original y el tiempo de intervención. Los indicadores de amenaza restantes (Tabla 1), fueron obtenidos de la TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), del Estudio Nacional del Agua (ENA) (Ideam, 2019), de los indicadores del análisis de vulnerabilidad marino costera e insular ante el cambio climático de la TCNCC (Invemar, 2017), y de la base de datos Terridata del Departamento Nacional de Planeación (<https://terridata.dnp.gov.co/>). Los indicadores de sensibilidad (Tabla 2), fueron obtenidos del Estudio Nacional del Agua (ENA) (Ideam, 2019), de la TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), y de la base de datos Terridata. Finalmente, los indicadores de capacidad adaptativa fueron obtenidos de la TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), de la base de datos Terridata, del sistema de información para la gestión de los manglares Sigma (<http://sigma.invemar.org.co/>), y de la capa “Global Mangrove Distribution”, Aboveground Biomass, and Canopy Height”, disponible en el ORNL DAAC (Simard *et al.*, 2019).

ENSO (El Niño Southern Oscillation) period was adjusted to the operational designation of El Niño/La Niña under the ONI index by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), which defined these events as “a phenomenon in the equatorial Pacific characterized by an increase/decrease in Sea Surface Temperature (SST) with respect to the base period, in the Niño 3.4 region, and equal or greater in magnitude to (+/-) 0.5 °C, averaged over a period of three consecutive months, and sustained for five periods” (Larkin and Harrison, 2005). When the ONI index was in its warm phase, an El Niño (EN) period was identified, while, when the ONI index was in its cold phase, a La Niña (LN) period was identified. The remaining periods were considered neutral and employed as the baseline reference to calculate the percent changes in precipitation and temperature during each event (EN/LN).

The percent change in land cover (artificialized and agricultural territories, forests and seminatural areas, wet areas, and water surfaces) (Table 1) was estimated by crossing layers of the 2017 land cover of Colombia at a 1:25.000 scale (<https://siac-datosabiertos-mads.hub.arcgis.com>), with the projected increase in sea level rise by 2040 (Invemar, 2017). The human footprint index (Table 1) was used as an indicator of anthropogenic impact. This index was calculated by Correa *et al.* (2020) while considering land use, rural population density, distance to roads, distance to urban settlements, the fragmentation index, the biomass index relative to the original biomass, and the time of intervention. The remaining threat indicators (Table 1) were obtained from the TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), from the National Water Study (ENA) (Ideam, 2019), from the TCNCC’s indicators of the marine-coastal and insular vulnerability analysis regarding climate change (Invemar, 2017), and from the Terridata database of the National Planning Department (<https://terridata.dnp.gov.co/>). The sensitivity indicators (Table 2) were obtained from the National Water Study (ENA) (Ideam, 2019), from the TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), and from the Terridata database. Finally, the adaptive capacity indicators were obtained from the TCNCC (Ideam *et al.*, 2017), from the Terridata database, from the information system for the management of mangroves (Sigma, <http://sigma.invemar.org.co/>), and from the layer Global Mangrove Distribution, Aboveground Biomass, and Canopy Height layer of the ORNL DAAC (Simard *et al.*, 2019).

**Tabla 2.** Indicadores de sensibilidad usados en el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar.

Indicador / Indicator	Fuente / Source
Evaluación integrada recurso hídrico / Integrated water resource assessment	ENA (Ideam, 2019)
Oferta hídrica disponible (año seco) / Available water supply (dry year)	ENA (Ideam, 2019)
Oferta hídrica disponible (año húmedo) / Available water supply (wet year)	ENA (Ideam, 2019)
Índice de regulación hídrica / Water regulation index	ENA (Ideam, 2019)
Variabilidad de la oferta hídrica / Water supply variability	ENA (Ideam, 2019)
Estado de salud y prioridad de restauración del manglar / Mangrove health status and restoration priority	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Déficit cuantitativo de vivienda / Quantitative housing deficit	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Índice de pobreza multidimensional / Multidimensional poverty index	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)

**Table 2.** Sensitivity indicators used in the vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socioecosystem

**Tabla 3.** Indicadores de capacidad adaptativa usados en el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar.

Indicador / Indicator	Fuente / Source
Porcentaje de áreas de manglar con zonificación aprobada para su manejo y ordenamiento ambiental / Percentage of mangrove areas with approved zoning for environmental management and planning	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Asignación de recursos para el Programa de Enfermedades Transmitidas por Vectores–ETV / Resource allocation for the Vector-Transmitted Diseases Program (ETV)	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Índice de desempeño integral municipal / Integral municipal performance index	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Respuesta a la ola invernal / Response to the winter wave	TCNCC (Ideam <i>et al.</i> , 2017)
Puntaje Sisben: Promedio–Rural disperso / Sisben score: average – dispersed rural	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Total de recursos asignados per cápita–SGR (Bienio) / Total resources allocated per capita, SGR (biennium)	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Indicador de desempeño fiscal / Fiscal performance indicator	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Inversión–Agua potable y saneamiento básico (sin incluir proyectos de vis) / Investment – drinking water and basic sanitation (not including VIS projects)	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Inversión–Ambiental / Investment – environmental	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Inversión–Prevención y atención de desastres / Investment – disaster prevention and response	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Inversión–Desarrollo comunitario / Investment – community development	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Porcentaje del área de la entidad territorial que hace parte del SINAP / Percent area of the territorial entity that is part of SINAP	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Porcentaje del área de manglares / Percentage of mangrove area	SigmaV8 (Invemar)
Resguardos indígenas (ha) / Indigenous reserves (ha)	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)

**Table 3.** Adaptive capacity indicators used in the vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socioecosystem



Indicador / Indicator	Fuente / Source
Consejos comunitarios (ha) / Community councils (ha)	Terridata (Departamento Nacional de Planeación) / (National Planning Department)
Biomasa aérea del manglar (Mg ha-1) / Mangrove aboveground biomass (Mg ha-1)	Global Mangrove Distribution (Simard <i>et al.</i> , 2019)
Altura ponderada del área basal del manglar (m) / Mangrove weighted basal area height (m)	Global Mangrove Distribution (Simard <i>et al.</i> , 2019)
Máxima altura del dosel del manglar (m) / Maximum mangrove canopy height (m)	Global Mangrove Distribution (Simard <i>et al.</i> , 2019)

Para cada una de las dimensiones (amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa) se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) en cada costa (Pacífico y Caribe). Inicialmente se realizó un análisis ACP que incluyó ambas costas, pero debido a las diferencias biogeográficas y socioeconómicas de las dos costas de Colombia, se evidenció la necesidad de realizar el análisis por separado para cada costa, lo cual permitió corroborar esas fuertes diferencias. En un ACP se obtienen componentes o combinaciones lineales de las variables originales que permiten simplificar el universo de estudio, concentrándose en los componentes que sintetizan la máxima varianza residual. Los objetivos de un ACP se pueden resumir en tres puntos: 1) generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto de datos original, 2) reducir la dimensionalidad de los datos que se están tratando para realizar futuros análisis y 3) eliminar algunas variables que aportan poca información al análisis (Legendre y Legendre, 1998; Emery y Thompson, 2014). Este último punto fue uno de los criterios utilizados para priorizar los indicadores de cada dimensión (22 de amenaza, 8 de sensibilidad y 18 de capacidad adaptativa). A partir de la proporción de varianza explicada por cada CP, se seleccionaron los componentes que de manera acumulativa explicaban por lo menos 60 % de la varianza total de los datos. En todos los casos (amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa), esto ocurrió solo con dos componentes principales (CP). Los índices de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa fueron obtenidos ponderando los subíndices de las unidades de muestreo (“scores” del ACP) por el aporte de variabilidad de cada CP. La vulnerabilidad fue calculada como la sensibilidad sobre la capacidad adaptativa ( $V = S/CA$ ), y el riesgo como la amenaza por la vulnerabilidad ( $R = A*V$ ) (Ideam *et al.*, 2017; IPCC, 2022). Finalmente, para facilitar la interpretación de la vulnerabilidad y el riesgo, los índices obtenidos fueron estandarizados a valores entre cero y uno, para cada costa y categorizados en cuatro categorías usando los cuartiles bajo, medio, alto y extremo.

Regarding each dimension (threats, sensitivity, and adaptive capacity), a principal components analysis (PCA) was conducted for each coast (Pacific and Caribbean). Initially, a PCA that included both coasts was conducted, but, due to the biogeographical and socioeconomic differences between these two regions of Colombia, we evidenced the need for a separate analysis of each coast, allowing to corroborate these significant differences. In a PCA, the components or linear combinations of the original variables are obtained, enabling the simplification of the study universe, focusing on the components that synthesize the maximum residual variance. The objectives of a PCA can be summarized in three points: 1) generating new variables that can express the information contained in the original dataset, 2) reducing the dimensionality of the handled data to perform future analyses, and 3) eliminating some variables that contribute little information to the analysis (Legendre and Legendre, 1998; Emery and Thompson, 2014). This last point was one of the criteria used to prioritize the indicators of each dimension (22 for threats, 8 for sensitivity, and 18 for adaptive capacity). Based on the proportion of variance explained by each principal component (PC), the components that cumulatively explained at least 60 % of the total variance of the data were selected. In all cases (threat, sensitivity, and adaptive capacity), this occurred with only two PC. The threat, sensitivity, and adaptive capacity indices were obtained by weighting the subindices of the sampling units (‘scores’ of the PCA) by the variability contribution of each PC. Vulnerability was calculated as sensitivity over adaptive capacity ( $V=S/CA$ ), and risk as threat by vulnerability ( $R=A*V$ ) (Ideam *et al.*, 2017; IPCC, 2022). Finally, to facilitate the interpretation of vulnerability and risk, the obtained indices were standardized to values between 0 and 1 for each coast and placed in four categories using the low, medium, high, and extreme quartiles.

## RESULTADOS

El Análisis de Componentes Principales (ACP), que incluyó las dos costas, permitió identificar que el índice de vulnerabilidad y riesgo promedio fue mayor para los manglares ubicados en los municipios del Caribe, en relación con los del Pacífico. En los manglares del Caribe, también se encontró en promedio, una mayor sensibilidad, una menor capacidad adaptativa y un mayor índice de amenaza (Tabla 4).

**Tabla 4.** Índices promedio de sensibilidad, capacidad adaptativa, vulnerabilidad, amenaza y riesgo para los manglares del Pacífico y Caribe de Colombia.

Costa / Coast	Sensibilidad / Sensitivity	Capacidad adaptativa / Adaptive capacity	Vulnerabilidad / Vulnerability	Amenaza / Threat	Riesgo / Risk
<b>Caribe / Caribbean</b>	0.74 ± 0.12	0.14 ± 0.10	0.29 ± 0.16	0.78 ± 0.19	0.25 ± 0.05
<b>Pacífico / Pacific</b>	0.27 ± 0.12	0.72 ± 0.20	0.07 ± 0.01	0.29 ± 0.12	0.04 ± 0.01

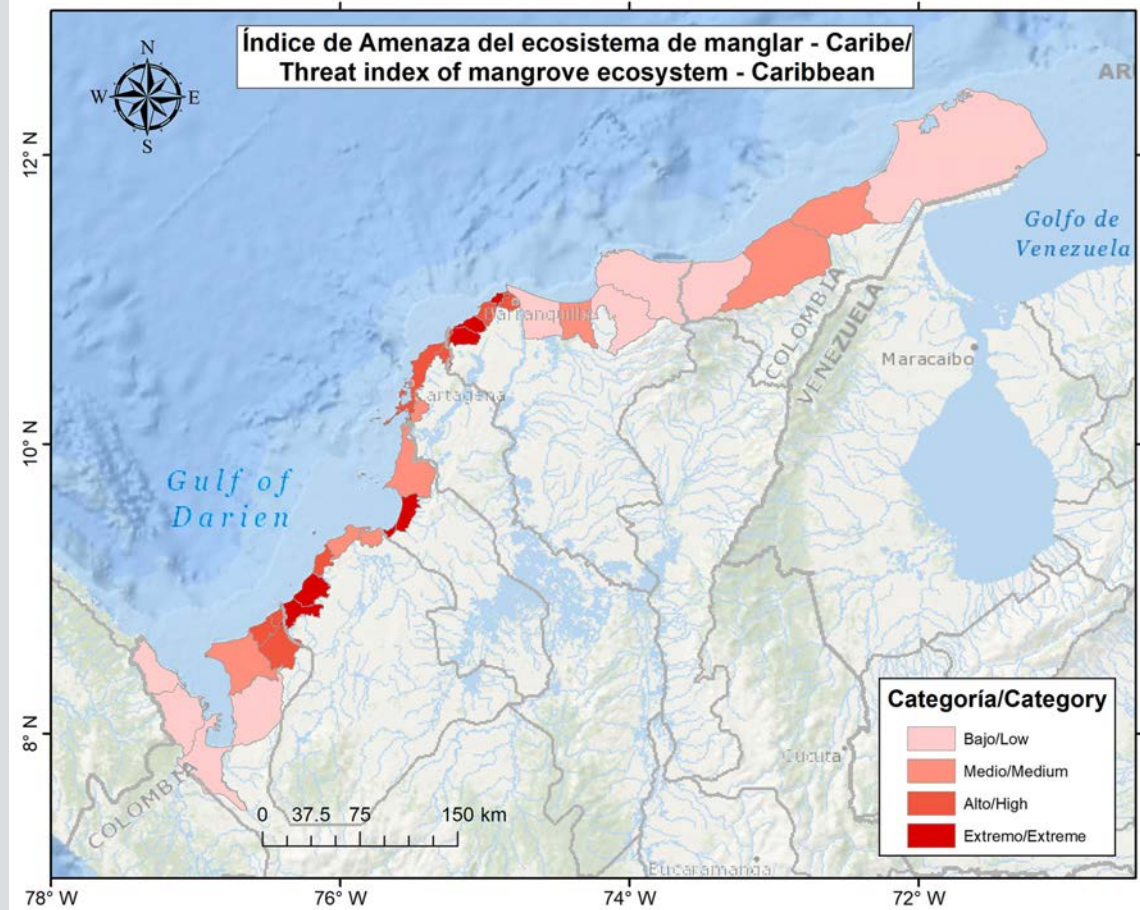
En el ACP para el Caribe de Colombia, los dos primeros CP extraídos para calcular los índices de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa, de los cuales se derivaron los índices de vulnerabilidad y riesgo, capturaron 72.10 %, 85.19 % y 76.57 % de la variabilidad, respectivamente. Los indicadores de amenaza que presentaron la mayor correlación (> 0.60) con los CP fueron: cambio en la oferta hídrica por cambio climático, cambio de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el escenario futuro (2040), ascenso en el nivel del mar en el escenario futuro (2040), cambio de la temperatura y la precipitación en el escenario futuro (2040), cambio de la temperatura durante eventos El Niño, pérdida de área idónea para especies amenazadas, porcentaje del área de la entidad territorial amenazada por fenómenos hidrometeorológicos y huella humana. Los indicadores de sensibilidad que tuvieron la mayor correlación (> 0.60) con los CP fueron: oferta hídrica disponible en año seco, índice de regulación hídrica, y estado de salud y prioridad de restauración del manglar. Los indicadores de capacidad adaptativa que presentaron la mayor correlación (> 0.60) con los CP fueron: porcentaje de áreas de manglar con zonificación aprobada para su manejo y ordenamiento ambiental, total de recursos asignados per cápita por el Sistema General de Regalías (SGR), porcentaje del área de manglares, biomasa aérea del manglar y área basal del manglar ponderada. Los mayores índices de amenaza para los manglares del Caribe (categoría “Extremo”), se encontraron entre el centro y el sur del litoral, en los municipios de Puerto Colombia, Juan de Acosta y Piojó (Atlántico), Tolú y Coveñas (Sucre), Puerto Escondido y Los Córdoba (Córdoba) (Figura 2) (Tabla 4).

## RESULTS

The PCA, which included both coasts, allowed identifying that the average vulnerability and risk index was higher for mangroves located in the municipalities of the Caribbean when compared to those in the Pacific. On average, in the Caribbean mangroves, a higher sensitivity, a lower adaptive capacity, and a higher threat index were found (Table 4).

**Table 4.** Average sensitivity, adaptive capacity, vulnerability, threat, and risk indices for the Pacific and Caribbean mangroves of Colombia

In the PCA for the Colombian Caribbean, the first two PCs extracted to calculate the threat, sensitivity, and adaptive capacity indices, from which the vulnerability and risk indices were derived, captured 72.10 %, 85.19 %, and 76.57 % of the variability, respectively. The threat indicators that showed the highest correlation (> 0.60) with the PCs were the changes in water supply due to climate change, the changes in sea surface temperature (SST) in the future scenario (2040), the sea level rise in the future scenario (2040), the changes in temperature and precipitation in the future scenario (2040), the changes in temperature during El Niño events, the loss of suitable area for threatened species, the percentage of the territorial entity’s area that is threatened by hydrometeorological phenomena, and the human footprint. The sensitivity indicators that had the highest correlation (> 0.60) with the PCs were the water supply available in a dry year, the water regulation index, and the health status and restoration priority of the mangrove. The adaptive capacity indicators that showed the highest correlation (> 0.60) with the PCs were the percentage of mangrove areas with approved zoning for environmental management and planning, the total resources *per capita* allocated by the General System of Royalties (SGR), the percentage of mangrove area, the mangrove aboveground biomass, and the mangrove weighted basal area. The highest threat indices for the Caribbean mangroves (extreme category) were found between the center and south of the littoral, in the municipalities of Puerto Colombia, Juan de Acosta, and Piojó (Atlántico); in Tolú and Coveñas (Sucre); and in Puerto Escondido and Los Córdoba (Córdoba) (Figure 2, Table 4).



**Figura 2.** Índice de amenaza del socioecosistema de manglar del Caribe de Colombia.

**Figure 2.** Threat index for the mangrove socioecosystem in the Colombian Caribbean

Los manglares que presentaron la mayor vulnerabilidad (categoría Extremo), estuvieron asociados a los municipios de Manaure, Uribia y Riohacha (La Guajira), Tubará, Juan de Acosta, Barranquilla y Puerto Colombia (Atlántico), Puerto Escondido y Los Córdoba (Córdoba). Adicionalmente, los manglares de Dibulla, Ciénaga, Piojó, Santa Catalina, Cartagena de Indias, Moñitos, Arboletes, San Juan de Urabá y Necoclí tuvieron un índice de vulnerabilidad en la categoría Alto (Figura 3) (Tabla 4). En total 60 % de los municipios presentaron manglares con vulnerabilidad Extrema y Alta. De otro lado, los manglares que presentaron el mayor índice de riesgo se encontraron en los municipios de Manaure (La Guajira), Barranquilla, Puerto Colombia, Tubará y Juan de Acosta (Atlántico), Puerto Escondido y Los Córdoba (Córdoba) (Figura 4, Tabla 4). Siete municipios más presentaron un índice de riesgo Alto: Uribia, Riohacha, Piojó, Santa Catalina, Moñitos, Arboletes y San Juan de Urabá (Figura 4, Tabla 4). En total, 47 % de los municipios presentaron manglares con riesgo Extremo y Alto.

The mangroves exhibiting the highest vulnerability (extreme category) were associated with the municipalities of Manaure, Uribia, and Riohacha (La Guajira); Tubará, Juan de Acosta, Barranquilla, and Puerto Colombia (Atlántico); and Puerto Escondido and Los Córdoba (Córdoba). In addition, the mangroves in Dibulla, Ciénaga, Piojó, Santa Catalina, Cartagena de Indias, Moñitos, Arboletes, San Juan de Urabá, and Necoclí reported a vulnerability index in the high category (Figure 3, Table 4). In total, 60 % of the municipalities exhibited mangroves with extreme and high vulnerability. On the other hand, mangroves with the highest risk index were found in the municipalities of Manaure (La Guajira); Barranquilla, Puerto Colombia, Tubará, and Juan de Acosta (Atlántico); and Puerto Escondido and Los Córdoba (Córdoba) (Figure 4, Table 4). Seven additional municipalities exhibited a high risk index, *i.e.*, Uribia, Riohacha, Piojó, Santa Catalina, Moñitos, Arboletes, and San Juan de Urabá (Figure 4, Table 4). In total, 47 % of the municipalities showed mangroves with extreme and high risk.

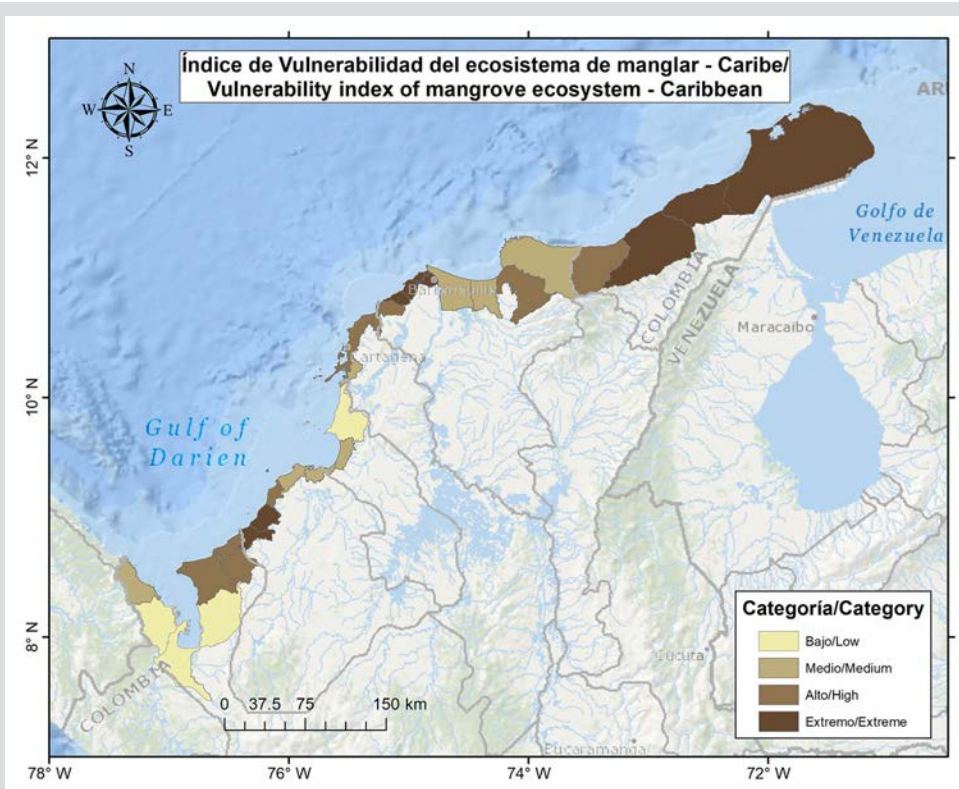


Figura 3. Índice de vulnerabilidad del socioecosistema de manglar del Caribe de Colombia.

Figure 3. Vulnerability index for the mangrove socioecosystem in the Colombian Caribbean.

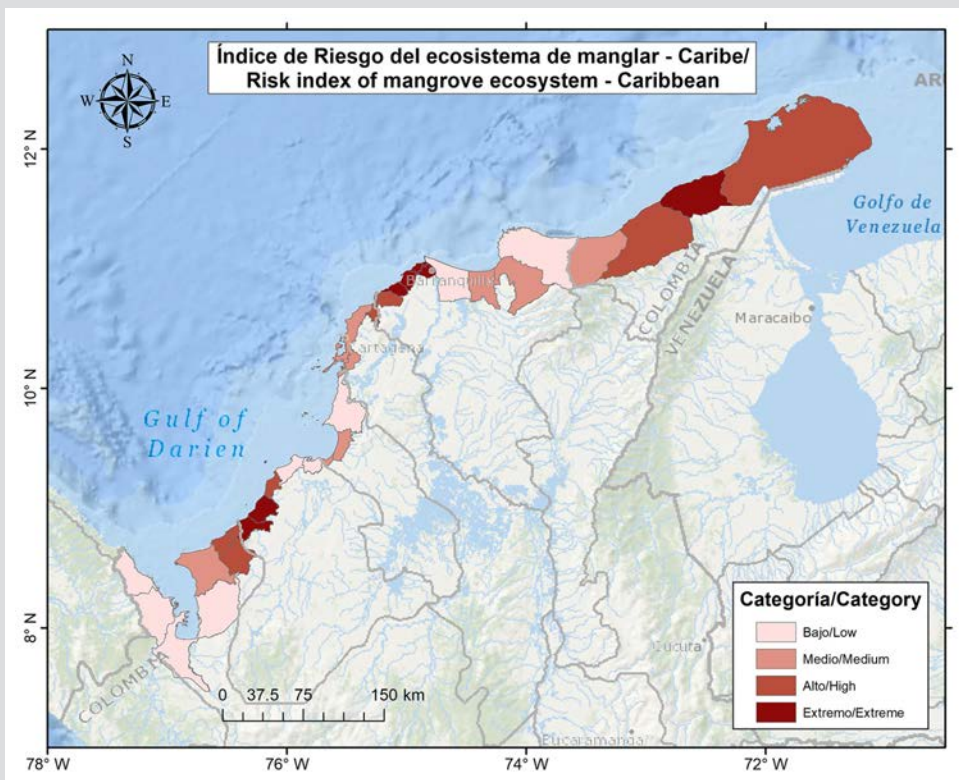


Figura 4. Índice de riesgo del socioecosistema de manglar del Caribe de Colombia.

Figure 4. Risk index for the mangrove socioecosystem in the Colombian Caribbean.



**Tabla 4.** Índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del socioecosistema de manglar del Caribe de Colombia.

**Table 4.** Threat, vulnerability, and risk indices for the mangrove socioecosystem in the Colombian Caribbean.

Departamento / Department	Municipio / Municipality	Amenaza / Threat	Vulnerabilidad / Vulnerability	Riesgo / Risk
La Guajira	Uribia	0.19	0.51	0.27
	Manaure	0.47	0.86	0.62
	Riohacha	0.38	0.38	0.26
	Dibulla	0.23	0.22	0.12
Magdalena	Santa Marta	0.29	0.05	0.03
	Ciénaga	0.31	0.12	0.08
	Puebloviejo	0.46	0.06	0.05
	Sitionuevo	0.17	0.04	0.01
Atlántico	Barranquilla	0.83	0.40	0.40
	Puerto Colombia	0.97	0.35	0.39
	Tubará	0.89	1.00	1.00
	Juan de Acosta	1.00	0.42	0.47
	Piojó	0.89	0.34	0.36
Bolívar	Santa Catalina	0.79	0.30	0.30
	Cartagena de Indias	0.89	0.08	0.11
	Turbana	0.77	0.06	0.08
Sucre	San Onofre	0.76	0.02	0.04
	Tolú	1.00	0.04	0.07
	Coveñas	1.00	0.03	0.06
Córdoba	San Antero	0.73	0.03	0.05
	San Bernardo del Viento	0.55	0.03	0.04
	Moñitos	0.87	0.15	0.17
	Puerto Escondido	0.93	0.85	0.87
	Los Córdoba	0.93	0.40	0.42
Antioquia	Arboletes	0.87	0.22	0.23
	San Juan de Urabá	0.85	0.29	0.30
	Necoclí	0.49	0.18	0.14
	Turbo	0.23	0.03	0.02
Chocó	Unguía	0.18	0.02	0.01
	Acandí	0.17	0.04	0.02

En el ACP para el Pacífico de Colombia, los dos primeros CP extraídos para calcular los índices de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa, capturaron 77.55 %, 80.05 % y 71.17 % de la variabilidad, respectivamente. Los indicadores de amenaza que presentaron la mayor correlación (> 0.60) con los CP fueron: cambio en la oferta hídrica por cambio climático, cambio de la precipitación en el escenario futuro (2040), cambio de la temperatura durante eventos El Niño, cambio de la precipitación durante eventos La Niña y

In the PCA for the Pacific region of Colombia, the first two PCs extracted to calculate the threat, sensitivity, and adaptive capacity indices captured 77.55 %, 80.05 %, and 71.17 % of the variability, respectively. The threat indicators that showed the highest correlation (> 0.60) with the PCs were the changes in water supply due to climate change, the changes in precipitation in the future scenario (2050), the changes in temperature during El Niño events, the changes in precipitation during La Niña events, and

cambio en la cobertura de manglar por cambio en la línea de costa a 2040. Los indicadores de sensibilidad que tuvieron la mayor correlación ( $> 0.60$ ) con los CP fueron: evaluación integrada del recurso hídrico, oferta hídrica disponible en año seco, índice de regulación hídrica, y estado de salud y prioridad de restauración del manglar. Los indicadores de capacidad adaptativa que presentaron la mayor correlación ( $> 0.60$ ) con los CP fueron: índice de desempeño integral municipal, indicador de desempeño fiscal, porcentaje del área de manglares y biomasa aérea del manglar. Los mayores índices de amenaza para los manglares del Pacífico (categoría Extremo), se encontraron principalmente al sur del litoral, en los municipios de Santa Bárbara, Olaya Herrera, y Francisco Pizarro (Nariño), y también al norte, en el municipio de Bahía Solano (Chocó) (Figura 5) (Tabla 6).

the changes in mangrove cover due to coastline changes by 2040. The sensitivity indicators that had the highest correlation ( $> 0.60$ ) with the PCs were the integrated water resource assessment, the water supply available in a dry year, the water regulation index, and the mangrove health status and restoration priority. The adaptive capacity indicators that exhibited the highest correlation ( $> 0.60$ ) with the PCs were the integral municipal performance index, the fiscal performance indicator, the percentage of mangrove area, and the mangrove aboveground biomass. The highest threat indices for the Pacific mangroves (extreme category) were mainly found in the southern part of the littoral, in the municipalities of Santa Bárbara, Olaya Herrera, and Francisco Pizarro (Nariño); and also in the north, in the municipality of Bahía Solano (Chocó) (Figure 5, Table 6).

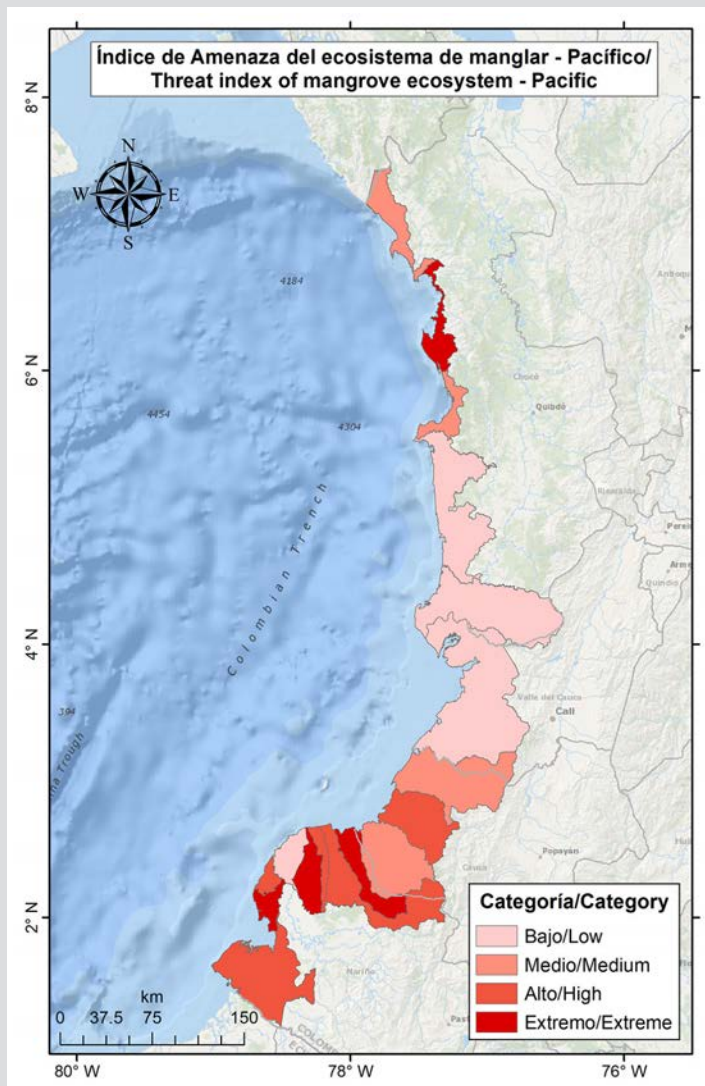


Figura 5. Índice de amenaza del socioecosistema de manglar del Pacífico de Colombia.

Figure 5. Threat index for the mangrove socioecosystem in the Colombian Pacific.

Los manglares que presentaron la mayor vulnerabilidad (categoría Extremo) estuvieron asociados a los municipios de Bahía Solano (Chocó), Buenaventura (Valle del Cauca), La Tola y Olaya Herrera (Nariño). Adicionalmente, los manglares de López, El Charco, Francisco Pizarro y Tumaco tuvieron un índice de vulnerabilidad en la categoría Alto (Figura 6) (Tabla 5). En total 50 % de los municipios presentaron manglares con vulnerabilidad en las categorías Extremo y Alto. Los manglares que presentaron el mayor riesgo se encontraron en los municipios de Bahía Solano (Chocó), La Tola, Olaya Herrera, y Francisco Pizarro (Nariño). Cinco municipios más presentaron un índice de riesgo Alto: Juradó, López, Santa Bárbara, El Charco y Tumaco (Figura 6, Tabla 5). En total, 56 % de los municipios presentaron manglares con riesgo en las categorías Extremo y Alto.

The mangroves that exhibited the highest vulnerability (extreme category) were associated with the municipalities of Bahía Solano (Chocó); Buenaventura (Valle del Cauca); and La Tola and Olaya Herrera (Nariño). In addition, the mangroves of López, El Charco, Francisco Pizarro, and Tumaco had a vulnerability index in the high category (Figure 6, Table 5). In total, 50 % of the municipalities exhibited mangroves with vulnerability in the extreme and high categories. The mangroves with the highest risk were found in the municipalities of Bahía Solano (Chocó) and La Tola, Olaya Herrera, and Francisco Pizarro (Nariño). Five additional municipalities exhibited a high risk index, *i.e.*, Juradó, López, Santa Bárbara, El Charco, and Tumaco (Figure 6, Table 5). In total, 56 % of the municipalities reported mangroves with risk indices in the extreme and high categories.

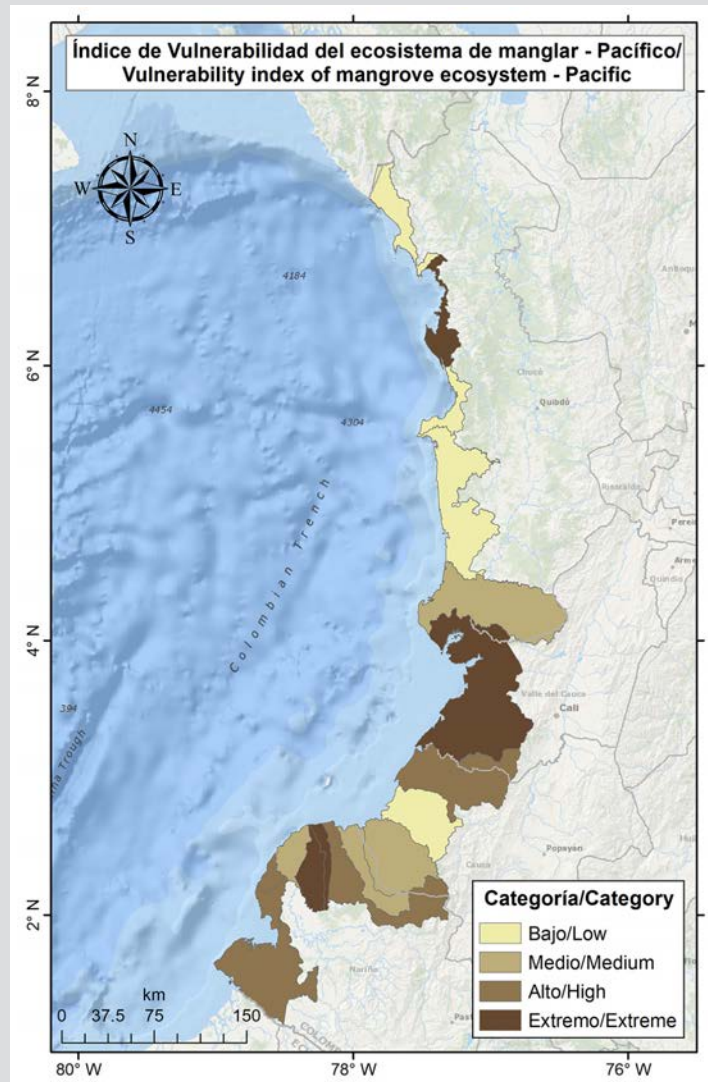


Figura 6. Índices de vulnerabilidad y riesgo del socioecosistema de manglar del Pacífico de Colombia.

Figure 6. Vulnerability and risk indices for the mangrove socioecosystem in the Colombian Pacific.

**Tabla 5.** Índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del socioecosistema de manglar del Pacífico de Colombia.

Departamento / Department	Municipio / Municipality	Amenaza / Threat	Vulnerabilidad / Vulnerability	Riesgo / Risk
Chocó	Juradó	0.38	0.22	0.23
	Bahía Solano	0.59	1.00	1.00
	Nuquí	0.28	0.22	0.18
	Bajo Baudó	0.14	0.21	0.12
	El Litoral del San Juan	0.14	0.23	0.12
Valle del Cauca	Buenaventura	0.14	0.84	0.21
Cauca	López	0.31	0.46	0.33
	Timbiquí	0.40	0.21	0.23
	Guapi	0.37	0.22	0.23
Nariño	Santa Bárbara	0.60	0.32	0.42
	El Charco	0.53	0.47	0.50
	La Tola	0.41	0.68	0.56
	Olaya Herrera	1.00	0.57	0.97
	Mosquera	0.16	0.36	0.19
	Francisco Pizarro	0.69	0.47	0.62
	Tumaco	0.42	0.51	0.45

**Table 5.** Threat, vulnerability, and risk indices for the mangrove socioecosystem in the Colombian Pacific.

## DISCUSIÓN

Los manglares del Caribe de Colombia presentaron un mayor índice de riesgo que los del Pacífico y una mayor cantidad de amenazas climáticas que explicaron ese mayor riesgo, además del índice de huella humana que cuantifica los efectos antrópicos. Entre las amenazas climáticas fue posible encontrar unas en la escala estacional (*e.g.* porcentaje del área de la entidad territorial amenazada por fenómenos hidrometeorológicos), otras en la escala interanual (*e.g.* cambio de la temperatura durante eventos El Niño), otras asociadas a cambio climático (*e.g.* ascenso del nivel del mar y cambio en la oferta hídrica por cambio climático), además de las amenazas antropogénicas que pueden exacerbar las climáticas y aumentar los niveles de vulnerabilidad del socioecosistema.

Los humedales costeros del Caribe de Colombia, durante las últimas dos décadas, han tenido una disminución en la escorrentía y consecuentemente han presentado una disminución en el aporte de agua hacia los humedales costeros como los manglares (*e.g.* Ciénaga Grande de Santa Marta-CGSM, León-Atrato) (Ahlén *et al.*, 2021). De acuerdo al cambio de la oferta hídrica por cambio climático, esta tendencia se agudizará principalmente en los municipios de Puerto Colombia, Tubará, Juan de Acosta y Piojó, donde la reducción será de entre 38 - 45 %. Estos municipios del

## DISCUSSION

The mangroves in the Colombian Caribbean exhibited a higher risk index than those in the Pacific and a greater number of climatic threats that explained the increased risk, in addition to the human footprint index, which quantifies anthropogenic effects. Among the climatic threats, some were found on a seasonal scale (*e.g.*, the percentage of the territorial entity's area that is threatened by hydrometeorological phenomena), others on an interannual scale (*e.g.*, the change in temperature during El Niño events), and others associated with climate change (*e.g.*, sea level rise and changes in water supply due to climate change), as well as anthropogenic threats that can exacerbate climatic ones and increase the socioecosystem's vulnerability levels.

Over the last two decades, the coastal wetlands of the Colombian Caribbean have experienced a reduction in runoff, and, consequently, they have exhibited a decrease in the water supply to ecosystems such as mangroves (*e.g.*, Ciénaga Grande de Santa Marta, or CGSM; León-Atrato) (Ahlén *et al.*, 2021). According to the change in water supply due to climate change, this trend will mainly intensify in the municipalities of Puerto Colombia, Tubará, Juan de Acosta, and Piojó, where the reduction will be between 38 and 45 %. These municipalities of the department of



departamento de Atlántico, junto con Barranquilla, presentaron los manglares con el mayor índice de riesgo. Aunque la unidad de análisis fue municipal, se deben considerar también los efectos en la escala de cuenca. Por ejemplo, el río Magdalena, principal aportante de agua dulce a la CGSM, durante los eventos ENOS presenta una gran variabilidad en su caudal lo que a su vez repercute en la salinidad del sistema. Las dos fases, cálida El Niño y fría La Niña, pueden generar condiciones extremas que deterioran el manglar. Durante El Niño, se presenta un incremento de la salinidad a causa de la disminución de los flujos de agua dulce que ingresan al sistema lagunar, lo que genera una disminución en la densidad de plántulas y de propágulos (Invemar, 2018). De otro lado, durante períodos de menor salinidad, asociados por ejemplo a La Niña, se favorece la dispersión de especies de agua dulce y el deterioro de los bosques de manglar (Invemar, 2000). Aunque estos cambios pueden estar inducidos por un clima cambiante, asociado con el aumento de la temperatura y la evapotranspiración y una disminución de la humedad, hay un componente de la variabilidad que es explicado por los cambios en el uso de la tierra y otras presiones antropogénicas, lo cual es muy evidente en el Caribe de Colombia. Por ejemplo, en el caso de la CGSM, el represamiento y la irrigación de agua para cultivos, son factores importantes que explican el aumento de las tasas de salinidad y la degradación masiva de los manglares, lo cual también se ha evidenciado en otras áreas del Caribe (Jaramillo *et al.*, 2018).

Se espera que el cambio climático reduzca las precipitaciones anuales en el centro y norte del Caribe colombiano (Ideam *et al.*, 2017), lo que incrementará drásticamente el estrés hídrico en los humedales costeros. En el escenario futuro (2040), las mayores reducciones de precipitación en el Caribe de Colombia se encontrarán en Puerto Colombia y Barranquilla (Atlántico), Manaure (Guajira) y Sitionuevo (Magdalena). Los manglares asociados a estos municipios, a excepción de Sitionuevo, presentaron los mayores índices de riesgo del Caribe. Una disminución en la precipitación puede generar cambios negativos en los flujos de agua dulce, y por lo tanto generar una disminución en la productividad del manglar, crecimiento, sobrevivencia de semillas y cambios en la composición de especies asociadas, favoreciendo las especies más tolerantes a la sal (Ellison, 2010). Al disminuir la precipitación es probable que disminuya la cobertura del manglar, la diversidad y se generen planos hipersalinos sin vegetación (Snedaker, 1995; Lovelock *et al.*, 2016). Una reciente y extensa pérdida de manglares en el norte de Australia, por ejemplo, se ha relacionado con condiciones de sequía debidas al cambio climático (Duke *et al.*, 2017).

Atlántico, along with Barranquilla, reported the mangroves with the highest risk index. Although the analysis unit was municipal, the effects on the basin scale must also be considered. For example, the Magdalena River, the main contributor of freshwater to the CGSM, exhibits significant flow variability during ENSO events, which in turn affects the salinity of the system. The two phases (the warm El Niño and the cold La Niña) can create extreme conditions that deteriorate the mangrove. During El Niño, there is an increase in salinity due to the reduction of freshwater flows entering the lagoon system, which decreases the density of seedlings and propagules (Invemar, 2018). On the other hand, during periods of lower salinity, associated, for example, with La Niña, the dispersal of freshwater species and the deterioration of mangrove forests are favored (Invemar, 2000). Although these changes may be induced by a changing climate, associated with an increase in temperature and evapotranspiration and with a decrease in humidity, there is a component of variability that is explained by changes in land use and other anthropogenic pressures, which is very evident in the Colombian Caribbean. For example, in the case of the CGSM, the damming and irrigation of water for crops are important factors that explain the increase in salinity rates and the massive degradation of mangroves, which has also been evidenced in other areas of the Caribbean (Jaramillo *et al.*, 2018).

Climate change is expected to reduce annual precipitation in the central and northern regions of the Colombian Caribbean (Ideam *et al.*, 2017), which will drastically increase water stress in coastal wetlands. In a future scenario (2050), the greatest reductions in precipitation in the Colombian Caribbean will be found in Puerto Colombia and Barranquilla (Atlántico), Manaure (La Guajira), and Sitionuevo (Magdalena). The mangroves associated with these municipalities, except for Sitionuevo, exhibited the highest risk indices in the Caribbean. A decrease in precipitation can lead to negative changes in freshwater flows and therefore reduce mangrove productivity, growth, seed survival, and changes in the associated species composition, favoring those more tolerant to salinity (Ellison, 2010). As precipitation decreases, mangrove coverage and diversity are likely to decrease, generating hypersaline, unvegetated flats (Snedaker, 1995; Lovelock *et al.*, 2016). A recent and extensive loss of mangroves in northern Australia, for example, has been linked to drought conditions caused by climate change (Duke *et al.*, 2017). Conversely, in the areas surrounding the Sierra Nevada de Santa Marta in the Colombian Caribbean, an increase in

De otro lado, en las zonas circundantes a la Sierra Nevada de Santa Marta en el Caribe de Colombia se espera para 2040 un incremento de precipitación que oscilará entre 70 - 80 % (resultados del análisis a partir de los GCM de WorldClim; Fick y Hijmans, 2017). Esto incluye los manglares presentes en los municipios de Santa Marta y Ciénaga (Magdalena) y Dibulla (La Guajira). Un incremento en la precipitación puede favorecer el incremento del área de cobertura de manglar, la diversidad de las zonas de manglar y las tasas de crecimiento de manglar en algunas especies (Field, 1995).

Para el Caribe de Colombia, en un escenario futuro, las aguas costeras de los municipios Juan de Acosta, Tubará y Piojó (Atlántico) y Santa Catalina (Bolívar) tendrán un incremento de la TSM entre 0.6 - 0.8 °C. Dado que las zonas costeras y someras se verán afectadas por el incremento de la TSM, se espera que los manglares sean impactados por estos cambios, ya que pueden provocar un estrés térmico en la estructura de las raíces del manglar y en el establecimiento de semillas (Unesco, 1992) y, así mismo, afectar la fotosíntesis (Andrews *et al.*, 1984).

Aunque no fue un indicador evaluado, la intensificación de las tormentas en frecuencia e intensidad está fuertemente asociado con el incremento de la TSM debido al cambio climático (Trenberth, 2005). Esta intensificación representa una amenaza adicional para los manglares. Por ejemplo, los grandes impactos de las tormentas han resultado en una mortalidad masiva en manglares del Caribe en los últimos 50 años (Armentano *et al.*, 1995). En la última valoración realizada por “Global Mangrove Watch”, se identificó que grandes tormentas o huracanes (*e.g.* Ida, Sandy) ocasionaron pérdidas importantes en las coberturas de manglar. Aunque no es una problemática para todo el Caribe continental, si lo es para el Caribe insular (Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina) y para la alta Guajira, donde las coberturas de manglar son reducidas. Estas áreas presentan un nivel de riesgo similar, con entre 5 - 19 huracanes por 100 años y entre 10 - 29 tormentas tropicales por 100 años (<https://www.nhc.noaa.gov/>). Por ejemplo, en la isla de Providencia (Caribe insular de Colombia), después del paso de los huracanes Eta e Iota entre octubre y noviembre de 2020, se observó una pérdida de follaje en los bosques de manglar con porcentajes de individuos muertos hasta de 46.4 %, (Garcés-Ordoñez *et al.*, 2021; Invemar, 2021).

Algunos modelos han sugerido que el incremento en la intensidad de las tormentas y los huracanes provocarán una disminución en la altura promedio de los manglares (Ning *et al.*, 2003). Así mismo, los aumentos proyectados en

precipitation is expected by 2040, with values oscillating between 70 % and 80 % (as per the results from the analysis based on the GCM of WorldClim; Fick and Hijmans, 2017). This includes the mangroves in the municipalities of Santa Marta and Ciénaga (Magdalena) and Dibulla (La Guajira). An increase in precipitation may favor the expansion of the mangrove cover area, the diversity of mangrove zones, and the growth rates of some mangrove species (Field, 1995).

For the Colombian Caribbean, in a future scenario, the coastal waters of the municipalities of Juan de Acosta, Tubará, and Piojó (Atlántico) and Santa Catalina (Bolívar) will experience a 0.6 - 0.8 °C increase in SST. Since coastal and shallow areas are affected by increases in SST, mangroves are expected to be impacted by these changes, as they can cause thermal stress on the structure of mangrove roots and on seed establishment (Unesco, 1992), in addition to affecting photosynthesis (Andrews *et al.*, 1984).

Though not an evaluated indicator, the intensification of storms in terms of frequency and intensity is strongly associated with the increase in SST due to climate change (Trenberth, 2005). This intensification represents an additional threat to mangroves. For example, significant storm impacts have resulted in massive mangrove mortality in the Caribbean over the last 50 years (Armentano *et al.*, 1995). In the latest assessment carried out by Global Mangrove Watch, it was identified that major storms or hurricanes (*e.g.*, Ida, Sandy) caused significant losses in mangrove cover. Although this is not a problem for the entire continental Caribbean, it is indeed for the insular Caribbean (Archipelago of San Andrés, Providencia, and Santa Catalina) and for the upper Guajira, where mangrove cover are reduced. These areas exhibit a similar risk level, with 5 - 19 hurricanes for every 100 years, as well as 10 - 29 tropical storms (<https://www.nhc.noaa.gov/>). For instance, on the island of Providencia (insular Colombian Caribbean), after the passage of hurricanes Eta and Iota between October and November 2020, a loss of foliage in mangrove forests was observed, with percentages of dead individuals reaching 46.4 % (Garcés-Ordoñez *et al.*, 2021; Invemar, 2021).

Some models have suggested that an increase in the intensity of storms and hurricanes will cause a reduction in the average height of mangroves (Ning *et al.*, 2003). Furthermore, the projected increases in the frequency of flooding events (Church *et al.*, 2004), be it due to storms or changes in the mean sea level, could affect the health and composition of mangroves due to salinity, recruitment, and sediment balance changes (Gilman *et al.*, 2006). Storm

la frecuencia de eventos de inundación (Church *et al.*, 2004), ya sea por tormentas o por cambios en el nivel medio del mar, podrían afectar la salud y la composición de los manglares debido a cambios en la salinidad, reclutamiento y cambios en el balance de sedimentos (Gilman *et al.*, 2006). Las marejadas ciclónicas también pueden inundar los manglares y, cuando se combinan con el aumento del nivel del mar, pueden generar su destrucción. Las inundaciones causadas por el aumento de las precipitaciones, las tormentas o el aumento relativo del nivel del mar pueden resultar en una disminución de la productividad, la fotosíntesis, y la supervivencia. Por ejemplo, la inundación de lenticelas en las raíces aéreas puede causar una disminución en las concentraciones de oxígeno en el manglar resultando en la muerte (Ellison, 2010).

El incremento en el nivel del mar es el más grande desafío climático que enfrentan los ecosistemas de manglar (Field, 1995). Los registros geológicos indican que anteriores fluctuaciones del nivel del mar han creado crisis y oportunidades para las comunidades de manglar y han sobrevivido o se han expandido en varios refugios (Field, 1995). Los manglares pueden adaptarse al incremento del nivel del mar si este ocurre lo suficientemente lento (Ellison y Stoddart, 1991), si existe un espacio de expansión adecuado y si se cumplen otras condiciones ambientales. Su éxito dependerá en gran medida de la producción y acumulación de sedimentos. Si su tasa de sedimentación excede la tasa de incremento del nivel del mar, algunos manglares tendrán una ventaja adaptativa sobre otras comunidades que no tengan esa característica. De acuerdo con McKee y Vervaeke (2018), para evitar la inmersión durante el aumento del nivel del mar, los manglares pueden construir superficies de suelo verticales mediante la acumulación de sedimentos inorgánicos y materia orgánica y así no ser alterados por ese aumento. Sin embargo, McKee *et al.* (2021) encontraron que algunos manglares no podrán responder adaptativamente a las tasas de incremento del nivel del mar y resaltan qué para comprender estas dinámicas, las conclusiones no deben basarse solamente en los datos de acreción de la superficie, ya que esto puede conducir a una evaluación inexacta de la vulnerabilidad costera. Por lo tanto, todos los movimientos de la superficie de la tierra y el subsuelo deben considerarse para comprender las tendencias locales del nivel del mar y evaluar el riesgo de inmersión de los manglares.

Otra ventaja adaptativa de los manglares será su capacidad para migrar en dirección al continente donde la topografía, y la infraestructura asociada a carreteras, diques, cultivos y canales de navegación jugarán un papel fundamental,

surges can also flood mangroves and, when combined with a sea level rise, can lead to their destruction. The flooding caused by increases in precipitation, storms, or relative sea level rise can result in decreased productivity, photosynthesis, and survival. For instance, the flooding of lenticels in aerial roots can cause a decrease in oxygen concentrations within the mangrove ecosystem, resulting in death (Ellison, 2010).

The sea level rise is the most significant climatic challenge faced by mangrove ecosystems (Field, 1995). Geological records indicate that past sea level fluctuations have created crises and opportunities for mangrove communities, which have either survived or expanded into various refuges (Field, 1995). Mangroves can adapt to sea level increases if it occurs slowly enough (Ellison and Stoddart, 1991), if there is an adequate space for expansion, and if other environmental conditions are met. Their success largely depends on the sediment production and accumulation. If their sedimentation rate exceeds that of the sea level rise, some mangroves will have an adaptive advantage over other communities that lack this characteristic. According to McKee and Vervaeke (2018), to avoid submersion during sea level rise, mangroves can build vertical soil surfaces via the accumulation of inorganic sediments and organic matter, thus not being altered by the rise. However, McKee *et al.* (2021) found that some mangroves will not be able to adaptively respond to sea level rise rates and highlight that, in order to understand these dynamics, conclusions should not be based solely on surface accretion data, as this can lead to an inaccurate assessment of coastal vulnerability. Therefore, all movements of the land surface and subsoil must be considered to understand local sea level trends and to assess the risk of mangrove submersion.

Another adaptive advantage of mangroves will be their ability to migrate inland, where topography and the infrastructure associated with roads, dykes, crops, and navigation channels will play a crucial role, since they can hinder migration onto land. To understand the impact of rising sea levels on mangrove socioecosystems, the factors affecting the ecosystem balance must also be considered, such as the type of substrate, coastal erosion, tidal range, local tectonics, freshwater availability, sediments, and the salinity of both the water column and the soil.

As for sea level rise, climatic variability at the seasonal and interannual scales (*e.g.*, changes in precipitation and in the frequency and intensity of storms) must also

ya que pueden impedir la migración hacia tierra firme. Para entender el impacto del incremento del nivel del mar en el socioecosistema de manglar también se deben tener en cuenta los factores que afectan el balance ecosistémico, como el tipo de sustrato, erosión costera, rango mareal, tectónica local, disponibilidad de agua dulce, sedimento y la salinidad tanto de la columna de agua como del suelo.

En relación con el incremento en el nivel del mar también se debe considerar la variabilidad climática en la escala estacional e interanual (*e.g.* cambios en las precipitaciones y frecuencia e intensidad de tormentas), ya que puede exacerbar los factores que afectan la respuesta del manglar al incremento del nivel del mar. Aunque no todas las regiones de Colombia tendrán una tasa de incremento similar en el nivel del mar, los manglares que predominan en zonas de bajo relieve con poco aporte de sedimentos serán los más vulnerables. En contraste, los ecosistemas de manglar con amplio suministro de sedimentos y/o el espacio suficiente para moverse hacia el interior, probablemente sobrevivirán a las tasas proyectadas de aumento del nivel del mar (McLeod y Salm, 2006). Bajo este escenario, es más probable encontrar una mejor respuesta en los manglares del Pacífico que del Caribe.

Las especies de manglar han demostrado diferentes tolerancias a los cambios en el nivel del mar, la salinidad y las tormentas, por lo que son consideradas en conjunto como un ecosistema resiliente. La resiliencia debe ser entendida como la habilidad de un sistema para someterse, absorber y responder al cambio y la perturbación, mientras mantiene sus funciones (Carpenter *et al.*, 2001). Por lo tanto, mantener o incrementar la resiliencia en los planes de conservación del manglar, requerirá una comprensión de cómo los manglares responden a los cambios climáticos, de los factores que les ayudan a sobrevivir a estos cambios y, en consecuencia, qué manglares tienen una mayor capacidad adaptativa y por lo tanto mayores oportunidades para sobrevivir a estos cambios.

Entre los manglares del Pacífico, los ubicados en los municipios Olaya Herrera y La Tola presentaron una vulnerabilidad y un riesgo en la categoría Extremo. Estos manglares son de gran importancia porque gran parte de ellos están ubicados en el Parque Nacional Natural (PNN) Sanquianga, el cual alberga la más extensa área de manglar del Pacífico colombiano y de Suramérica (Parques Nacionales Naturales, 2018). Esta área ha sufrido grandes cambios en las últimas décadas debido a la desviación del río Patía hacia el río Sanquianga, la cual inició en 1972 e incrementó con el terremoto de 1979, lo que ocasionó que el estuario se convirtiera en un sistema deltaico costero (Restrepo y Kettner,

be considered, as it can exacerbate the factors that affect the mangrove's response to rising sea levels. Although not all regions of Colombia will experience a similar sea level rise rate, the mangroves in low-relief areas with little sediment input will be the most vulnerable. In contrast, mangrove ecosystems with a broad supply of sediments and/or sufficient space to move inland will likely survive the projected sea level rise rates (McLeod and Salm, 2006). Under this scenario, it is more likely to find a better response in Pacific mangroves than in those of the Caribbean.

Mangrove species have demonstrated varying tolerances to changes in sea level, salinity, and storms, which is why they are collectively regarded as a resilient ecosystem. Resilience should be understood as a system's ability to undergo, absorb, and respond to change and disturbance while maintaining its functions (Carpenter *et al.*, 2001). Therefore, maintaining or increasing resilience in mangrove conservation plans requires an understanding of how mangroves respond to climate changes, of the factors that help them to survive these changes, and, consequently, of which mangroves have a greater adaptive capacity and thus better chances to survive these changes.

Among the Pacific mangroves, those located in the municipalities of Olaya Herrera and La Tola exhibited vulnerability and risk levels in the extreme category. These mangroves are of great importance because many of them are located in the Sanquianga National Natural Park (NNP), which houses the largest mangrove area in the Colombian Pacific and South America (Parques Nacionales Naturales, 2018). This area has undergone significant changes in recent decades due to the diversion of the Patía River towards the Sanquianga River, which started in 1972 and increased with the earthquake of 1979, causing the estuary to become a coastal deltaic system (Restrepo and Kettner, 2012). Despite the severe changes undergone by the system, Perea-Ardila and Murillo-Sandoval (2022) found that, over a 21-year period (1996 - 2017), the mangroves of the Sanquianga NNP experienced a net gain of 243.97 ha, although, from 2007 to 2017, this value was only 118.71 ha. These gains may be associated with the colonization of new lands and the migration of sandbanks, favoring the colonization of new mangrove areas. On the other hand, during the same period (1996 - 2017), the mangrove cover of the Sanquianga NNP experienced losses of 122.30 ha, mainly at the mouth of Guascama, south of the protected area. According to Murillo-Sandoval *et al.* (2022), for the 1984 - 2020 period, losses in the protected area have amounted to 500 ha,

2012). A pesar de los fuertes cambios que ha sufrido el sistema, Perea-Ardila y Murillo-Sandoval (2022) encontraron que durante un período de 21 años (1996 - 2017) los manglares del PNN Sanquianga tuvieron una ganancia neta de 243.97 ha, aunque en el período 2007 - 2017, este valor solo fue de 118.71 ha. Estas ganancias estarían asociadas con la colonización de nuevos terrenos y con la migración de bancos de arena que han favorecido la colonización de nuevas áreas de manglar. De otro lado, en ese mismo período (1996 - 2017) las coberturas de manglar del PNN Sanquianga tuvieron pérdidas de 122.30 ha, localizadas principalmente sobre la bocana de Guascama, al sur del área protegida. De acuerdo con Murillo-Sandoval *et al.* (2022), para el período 1984 - 2020 las pérdidas en el área protegida han sido de 500 ha y estas se han registrado principalmente sobre la línea de costa. La fuerte descarga del río Patía a través del delta Patía-Sanquianga, estaría erosionando el borde costero y los bordes de los ríos, generando fuertes procesos de sedimentación que estarían ocasionando una reducción en las coberturas de manglar.

Dado que uno de los indicadores que capturó la mayor variabilidad de los análisis de vulnerabilidad y riesgo para el Pacífico de Colombia fue el cambio en la cobertura de manglar por cambios en la línea de costa al 2040, se esperaría que la tendencia de la erosión del borde costero en las localidades donde se ubicaron los manglares con el mayor riesgo, se mantenga o incremente en el futuro. De acuerdo con Bunting *et al.* (2022), de las causas naturales de pérdida de manglar, la erosión costera es la más común a nivel global. Sin embargo, algunos factores humanos pueden exacerbar los procesos de erosión en muchas áreas como, por ejemplo, la reducción o interrupción de suministros de sedimentos provenientes de los ríos o de la zona costera. Así mismo, el incremento en el nivel del mar ocasionado por el cambio climático puede exacerbar la erosión costera en el litoral y generar un retroceso en el borde costero (Giri y Long, 2016).

La variabilidad climática interanual, principalmente asociada al ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS), tanto en su fase cálida (El Niño) como en su fase fría (La Niña), genera riesgos de impactos desfavorables para los sistemas humanos y naturales (Enfield, 2001). Uno de estos sistemas es el estuarino, al que se asocian grandes cinturones de manglar en el Pacífico y Caribe de Colombia. Según González y Correa (2001), en un estudio en el delta del Río San Juan, la precipitación y la descarga de los ríos y el incremento de los niveles del mar en una escala interanual, están asociados con el ciclo ENOS. El impacto directo de este tipo de eventos, produce grandes diferencias entre las descargas mínimas y máximas del río y

mainly recorded along the coastline. The strong discharge of the Patía River through the Patía-Sanquianga delta may be eroding the coastal and river edges, generating strong sedimentation processes that are causing a reduction in mangrove cover.

Given that one of the indicators that captured the most variability in the vulnerability and risk analyses for the Colombian Pacific was the change in mangrove cover due to coastline changes by 2040, the coastal edge erosion trend in the localities where the mangroves with the highest risk are located would be expected to continue or increase in the future. According to Bunting *et al.* (2022), among the natural causes of mangrove loss, coastal erosion is the most common worldwide. However, some human factors can exacerbate erosion processes in many areas, *e.g.*, the reduction or interruption of sediment supply from rivers or coastal areas. Additionally, the sea level rise caused by climate change can exacerbate coastal erosion in the littoral and lead to a retreat of the coastal edge (Giri and Long, 2016).

Interannual climatic variability, mainly associated with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) cycle, in both its warm (El Niño) and cold (La Niña) phases, poses risks of unfavorable impacts for human and natural systems (Enfield, 2001). One example is the estuarine system, associated with large mangrove belts in the Colombian Pacific and Caribbean. According to González and Correa (2001) regarding a study in the San Juan River delta, precipitation, river discharge, and sea level rise on an interannual scale are associated with the ENSO cycle. The direct impact of these events produces significant differences between the minimum and maximum river discharges, and it causes regional sea level variations, with marked effects on the coastline of the delta (Restrepo and Kjerfve, 2000; Restrepo *et al.*, 2002). Sea level increases, according to Morton *et al.* (2000), could have been the cause for the flooding of El Choncho barrier island in 1998 and for the strong coastal erosion process that led to the retreat of the coastline, destroying natural coastal protection structures such as mangroves. However, it should be considered that the two ENSO phases (El Niño/La Niña) can affect mangroves differentially. During an El Niño event with scarce rainfall, high salinity and low freshwater inputs from rivers and rain can cause the loss of significant mangrove areas, particularly with areas of restricted tides and/or in dry regions (Hickey *et al.*, 2021), such as the Colombian Caribbean. On the other hand, during a La Niña event with a significant increase in rainfall, a greater contribution of freshwater and sediments can favor

genera variaciones regionales en el nivel del mar con marcados efectos en la línea de costa del delta (Restrepo y Kjerfve, 2000; Restrepo *et al.*, 2002). Los incrementos del nivel del mar, según Morton *et al.* (2000), pudieron ser la causa de la inundación de la isla de barrera de El Choncho durante 1998 y del fuerte proceso de erosión costera que causó un retroceso de la línea de costa, destruyendo estructuras de protección costera naturales como los manglares. Sin embargo, se debe considerar que las dos fases del ENOS (El Niño/La Niña) pueden afectar de manera diferencial a los manglares. Durante un evento El Niño, con escasas precipitaciones, la alta salinidad y los bajos aportes de agua dulce provenientes de los ríos y la lluvia, pueden provocar la pérdida de importantes áreas de manglar, particularmente en áreas de mareas restringidas y/o regiones secas (Hickey *et al.*, 2021), como el Caribe de Colombia. De otro lado, durante un evento La Niña, con un fuerte incremento en las precipitaciones, un mayor aporte de agua dulce y sedimentos puede favorecer el incremento de las coberturas. No obstante, una mayor cantidad de agua puede provocar una inundación excesiva de los manglares, lo que podría tener efectos similares a los de la inmersión en condiciones de aumento en el nivel del mar a largo plazo y conducir a la pérdida de las coberturas de manglar (Pelckmans *et al.*, 2024).

Los bosques de manglar no solamente están amenazados por factores climáticos sino también antropogénicos, lo cual fue evidente en el gran aporte a la variabilidad del conjunto de datos del índice de Huella humana para el Caribe de Colombia. En la métrica del cálculo de este indicador están considerados las siguientes variables: el uso de la tierra, la densidad de la población rural, la distancia a carreteras, la distancia a asentamientos urbanos, el índice de fragmentación, el índice de biomasa en relación a la biomasa original y el tiempo de intervención (Correa *et al.*, 2020). Aunque los manglares son sistemas dinámicos, lo cual se refleja en sus procesos de pérdidas y ganancias, en las últimas décadas las pérdidas generadas por factores antropogénicos han incrementado significativamente, y el Caribe y el Pacífico de Colombia no son la excepción. A esta fuerte presión antrópica se le deben sumar las presiones asociadas al cambio climático, ya que en el futuro cercano estas exacerbarán las presiones actuales lo que se constituirá como una fuerte amenaza para los ecosistemas de manglar (Giri *et al.*, 2011).

Garcés-Ordoñez *et al.* (2023) encontraron para la ciénaga de Mallorquín, en el Caribe de Colombia, que los principales factores de degradación de los manglares son los vertidos de aguas residuales, vertederos de basura no regulados, la tala de manglares y expansión urbana. Esos vertimientos

the increase in cover. Nevertheless, a greater amount of water can cause the excessive flooding of mangroves, which could have effects similar to those of immersion under conditions of long-term sea level rise and lead to the loss of mangrove cover (Pelckmans *et al.*, 2024).

Mangrove forests are threatened not only by climatic factors, but also by anthropogenic ones, which was evident in their significant contribution to the variability of the dataset of the human footprint index for the Colombian Caribbean. In the metric of this indicator's calculation, the following variables are considered: land use, rural population density, distance to roads, distance to urban settlements, the fragmentation index, the biomass index relative to the original biomass, and time of intervention (Correa *et al.*, 2020). Although mangroves are dynamic systems, which is reflected in their loss and gain processes, in recent decades, the losses caused by anthropogenic factors have significantly increased, and the Colombian Caribbean and Pacific are no exception. To this strong anthropogenic pressure, the pressures associated with climate change must be added, as they will exacerbate current pressures in the near future, constituting a significant threat to mangrove ecosystems (Giri *et al.*, 2011).

Garcés-Ordoñez *et al.* (2023) found that, in the Mallorquín ciénaga in the Colombian Caribbean, the main mangrove degradation factors are the discharge of wastewater, unregulated garbage dumps, mangrove cutting, and urban expansion. Said discharges are impacting water and soil quality, while cutting and urban expansion have caused significant changes in the ecosystem, critically impacting the integrity of water, soil, and forests. Urban expansion is a threat that is particularly observed in the Caribbean, as it is the more developed of the two coasts of Colombia and boasts a greater number of population centers and inhabitants. For example, the most populous city in the Colombian Caribbean is Barranquilla, with an urban area of 154 km<sup>2</sup> and a population of 1.3 million, whereas Buenaventura, the main city on the Pacific coast, has an urban area of only 21.6 km<sup>2</sup> and a population of 323 000 (<https://www.dane.gov.co>). Urban expansion, along with the expansion of agricultural, livestock, and industrial frontiers in coastal areas, constitutes a serious threat to sensitive ecosystems like mangroves, as it not only implies a change in land use with consequent biodiversity degradation, but also occupies the areas that mangroves would require to expand in response to coastline changes and sea-level rises. According to Murillo-Sandoval *et al.* (2022), the transition

están impactando la calidad del agua y del suelo, mientras la tala y la expansión urbana han causado cambios significativos en el ecosistema, impactando críticamente la integridad del agua, el suelo y los bosques. La expansión urbana es una amenaza que se observa principalmente en el Caribe, debido a que, entre las dos costas de Colombia, es esta la más desarrollada y la que cuenta con un mayor número de centros poblados y de habitantes. Por ejemplo, la ciudad más poblada del Caribe de Colombia es Barranquilla con un área urbana de 154 km<sup>2</sup> y una población de 1.3 millones de habitantes, mientras que Buenaventura que es la principal ciudad del Pacífico cuenta apenas con un área urbana de 21.6 km<sup>2</sup> y una población de 323 000 habitantes (<https://www.dane.gov.co>). La expansión urbana junto con la de la frontera agrícola y agropecuaria e industrial en las zonas costeras, es una seria amenaza para ecosistemas tan sensibles como los manglares, ya que no solamente implica un cambio en el uso del suelo con una consecuente degradación de la biodiversidad, sino que también ocupa áreas que los manglares requerirían para su expansión ante cambios en la línea de costa e incrementos en el nivel del mar. De acuerdo con Murillo-Sandoval *et al.* (2022), la transición de manglares densos a otros tipos de vegetación, es la conversión más significativa que ha afectado las coberturas de manglares en Colombia.

Aunque en el Pacífico de Colombia, el índice de huella humana no fue uno de los principales indicadores que explicó el índice de riesgo, las actividades humanas como la minería de oro, la tala y la expansión del cultivo de coca, pueden afectar gravemente las coberturas de manglares. Según Kjerfve *et al.* (2001), es claro que los impactos antropogénicos asociados con el desarrollo costero tienen un importante efecto sinérgico para amplificar los impactos del cambio climático, principalmente los relacionados con la erosión costera. Como resultado de estas perturbaciones, las zonas estuarinas que, por ser un ecotono, albergan una gran diversidad, pueden llegar a experimentar notables cambios ecológicos.

Un aspecto importante transversal al riesgo climático de los manglares de Colombia está relacionado con la mitigación. Como todos los sistemas vegetales de la tierra, los manglares capturan carbono de la atmósfera y lo almacenan en la biomasa aérea (hojas, troncos y raíces) y en el suelo (carbono azul). Adicionalmente, las raíces del suelo pueden atrapar materia orgánica suspendida en el agua durante los flujos mareales, por lo que la cantidad de carbono almacenada en los ecosistemas de manglar puede ser hasta cuatro veces mayor a la que almacenan otros bosques, lo que hace de ellos aliados indispensables en la meta de lograr un mundo

from dense mangroves to other types of vegetation is the most significant conversion that has affected mangrove cover in Colombia.

Although, in the Colombian Pacific, the human footprint index was not one of the main indicators that explained the risk index, human activities such as gold mining, logging, and the expansion of coca cultivation can severely affect mangrove cover. According to Kjerfve *et al.* (2001), it is clear that anthropogenic impacts associated with coastal development have a significant synergistic effect on amplifying the impacts of climate change, mainly those related to coastal erosion. As a result of these disturbances, estuarine zones, which, being an ecotone, host a great diversity, can experience notable ecological changes.

A critical transversal aspect regarding the climate risk in Colombia's mangroves has to do with mitigation. Like all plant systems on Earth, mangroves capture carbon from the atmosphere and store it in aerial biomass (leaves, trunks, and roots) and in the soil (blue carbon). Additionally, soil roots can trap organic matter suspended in the water during tidal flows, which is why the amount of carbon stored in mangrove ecosystems can be up to four times greater than that stored by other forests, making them indispensable allies in the goal of achieving a carbon-neutral world (Lovelock and Reef, 2020). Globally, mangroves store approximately 6.23 ( $\pm 2.3$ ) gigatons of carbon, equivalent to 22.86 gigatons of CO<sub>2</sub>, and 87 % of this amount is found in the soil. At a global level, five countries hold 50 % of the total carbon stored in mangroves: Indonesia, Brazil, Nigeria, Australia, and Mexico. Colombia is in a second group with the Philippines and Madagascar, which, despite not having the largest mangrove extents, do have significant carbon concentrations (Leal and Spalding, 2022), in addition to the tallest mangroves in the world (Simard *et al.*, 2023). As for mitigation, the climate implications of mangrove loss, primarily in the long term, include a reduction in carbon storage in vegetation and soils (Macreadie *et al.*, 2021), as well as a reduction in the capacity to sequester carbon through photosynthesis and in the capture of material transported by rivers and coastal currents (Li *et al.*, 2018). An increase in CO<sub>2</sub> levels can generate greater photosynthetic activity and, therefore, an increase in mangrove growth rates (Lovelock, *et al.*, 2016). However, it has been found that this relationship occurs only at low salinities (Ball *et al.*, 1997), and thus a world enriched with CO<sub>2</sub> will not necessarily lead to mangrove cover growth. Therefore, it is necessary for these large amounts of carbon stored in mangroves

neutro en emisiones de carbono (Lovelock y Reef, 2020). Los manglares almacenan a nivel global 6.23 ( $\pm$  2.3) gigatoneladas de carbono, equivalentes a 22.86 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> y 87 % de esa cantidad se encuentra en el suelo. A nivel global, cinco países mantienen 50 % del carbono total almacenado en los manglares. Estos son Indonesia, Brasil, Nigeria, Australia y México. Colombia se encuentra en un segundo grupo junto con Filipinas y Madagascar, que, a pesar de no tener las más grandes extensiones de manglar, si cuentan con importantes concentraciones de carbono (Leal y Spalding, 2022), además de tener los manglares más altos del mundo (Simard *et al.*, 2023). En relación a la mitigación, las implicaciones climáticas de la pérdida de manglar, principalmente a largo plazo, incluyen una reducción del almacenamiento de carbono en la vegetación y los suelos (Macreadie *et al.*, 2021) y una reducción en la capacidad para secuestrar carbono a través de la fotosíntesis y en la captura de material transportado por ríos y corrientes costeras (Li *et al.*, 2018). En cuanto al CO<sub>2</sub>, un incremento en sus niveles, puede generar una mayor actividad fotosintética y por lo tanto un incremento en las tasas de crecimiento del manglar (Lovelock, *et al.*, 2016). Sin embargo, se ha encontrado que esta relación ocurre solamente en bajas salinidades (Ball *et al.*, 1997), y así un mundo enriquecido con CO<sub>2</sub> no necesariamente generará un crecimiento de las coberturas de manglar. Por lo tanto, es necesario que estas grandes cantidades de carbono almacenadas en los manglares sean conservadas, de manera que se evite potenciales futuras emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a la degradación del ecosistema o su desaparición. Para asegurar la sostenibilidad de los manglares será necesario realizar grandes esfuerzos para detener las pérdidas en las coberturas, restaurar las que tengan algún grado de deterioro e incrementar su protección. Retornar las áreas restaurables puede soportar el secuestro de carbono y asegurar el mantenimiento de importantes cantidades de carbono almacenados en la biomasa área y en el suelo.

## CONCLUSIONES

La estimación del riesgo climático para los socioecosistemas de manglar en Colombia, lo cual ha sido uno de los enfoques de este trabajo, facilita la identificación de las estrategias de adaptación y los sitios donde es urgente implementarlas, de manera que se pueda reducir el riesgo por cambio climático (IPCC, 2022). En el largo plazo la reducción de emisiones puede contribuir en algunos casos a disminuir los eventos climáticos extremos, pero dado que el cambio climático es un fenómeno global, esta reducción a escala local tendría una contribución poco significativa para

to be conserved, in order to prevent potential future CO<sub>2</sub> emissions due to ecosystem degradation or disappearance. To ensure the sustainability of mangroves, significant efforts will be necessary to stop cover losses, restore those with some degree of deterioration, and increase their protection. Recovering restorable areas can support carbon sequestration and ensure the maintenance of significant amounts of carbon stored in aerial biomass and in the soil.

## CONCLUSIONS

The assessment of climate risk for mangrove socioecosystems in Colombia, one of the focus points of this work, facilitates the identification of adaptation strategies and of the places where it is critical to implement them, in order to be able to reduce the risks associated with climate change (IPCC, 2022). In the long term, decreasing emissions can contribute, in some cases, to reducing extreme climatic events. However, given that climate change is a global phenomenon, this reduction, on the local scale, would make a contribution of little significance to reducing the risk due to climate change in the territory. Therefore, adaptation alternatives leading to risk reduction must be based on diminishing mangrove vulnerability and risk. They should place a special focus on Caribbean coastal mangroves, mainly those in the central area of the littoral in the department of Atlántico, as they reported the highest vulnerability and risk indices.

The reduction of risks and vulnerability may encompass a broad spectrum of actions that vary as needed, but it should generally be in line with the socioeconomic and sectorial development agenda of the country, some of these measures may be specific, *e.g.*, education regarding the risk due to climate change and its relationship with the risk of local climatic disasters or the improvement of early warning and response systems in the face of extreme climate events, or they could be as general as the implementation of restoration programs. The important thing is that the management of the risk due to climate change should be focused on reducing risk and vulnerability, as well as on increasing mangrove resilience against potential adverse impacts. Colombia harbors the greatest relatively intact mangrove extensions in the western hemisphere, and, for their conservation, constant monitoring is required in order to support management strategies considering hydrological, climatic, and socioeconomic factors. In this sense, these results constitute an input for climate management in the mangroves of Colombia, and they shall contribute to



la reducción del riesgo por cambio climático en ese territorio. Por lo tanto, las alternativas de adaptación conducentes a la reducción del riesgo deben estar basadas en la disminución de la vulnerabilidad y el riesgo de los manglares. Deben ser de especial atención los manglares de la costa Caribe, principalmente los del área centro del litoral en el departamento de Atlántico, debido a que presentaron los más altos índices de vulnerabilidad y riesgo.

La reducción de los riesgos y la vulnerabilidad puede abarcar un amplio espectro de acciones que varían según el caso, pero en general deben ser coincidentes con la agenda del desarrollo socioeconómico y sectorial del país. Algunas pueden ser específicas, como por ejemplo la educación sobre el riesgo por cambio climático y su relación con los riesgos de desastres climáticos locales, o la mejora de los sistemas de alerta temprana y respuesta a los eventos climáticos extremos, o tan generales como la implementación de programas de restauración. Lo importante es que la gestión del riesgo por cambio climático y la adaptación al cambio climático se debe centrar en la reducción del riesgo y la vulnerabilidad, y en aumentar la resiliencia de los manglares a sus potenciales impactos adversos. Colombia cuenta con las más grandes extensiones de manglar relativamente intactas del hemisferio occidental y para su conservación se requiere un seguimiento constante para apoyar estrategias de gestión que consideren factores hidrológicos, climáticos, y socioeconómicos. En este sentido, estos resultados son un insumo para la gestión climática de los manglares en Colombia y contribuirán al Programa Nacional de Manglares. Asimismo, podrán contribuir al Plan Nacional de Restauración de Manglares, la Contribución Nacionalmente Determinada de Colombia (NDC), la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia E2050 y los Planes Territoriales de Adaptación al Cambio Climático de los departamentos y municipios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo de conservación y gobernanza de WWF Colombia, en especial a María Campo, Jairo Gamboa y César Suárez, por su participación en el proceso de priorización de indicadores. A los asistentes del Taller de Manglares del XIX Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar Senalmar 2022, por sus valiosos aportes para mejorar los análisis. Estos resultados son parte del proyecto “Manglares para la Comunidad y el Clima”, financiado por la Fundación Bezos y ejecutado por WWF Colombia.

the National Mangrove Program. Likewise, they will be able to contribute to the National Mangrove Restoration Program, to the Nationally Determined Contribution (NDC) of Colombia, to the E2050 Long-Term Climate Strategy of Colombia, and to the departments and municipalities’ Territorial Plans of Adaptation to Climate Change.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the conservation and governance team of WWF Colombia, especially María Campo, Jairo Gamboa, and César Suárez, for their participation in the indicator prioritization process. They also thank the attendees of the Mangrove Workshop at the XIX National Seminar on Sciences and Technologies of the Sea (Senalmar 2022) for their valuable contributions to improving the analyses. These results are part of the project titled Mangroves for the community and climate, funded by the Bezos Earth Foundation and executed by WWF Colombia.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Áhlén, I., G. Vigouroux, G. Destouni, J. Pietroni, N. Ghajarnia, J. Anaya, J. Blanco, S. Borja, S. Chalov, K. P. Chun, N. Clerici, A. Desormeaux, P. Girard, O. Gorelits, A. Hansen, F. Jaramillo, Z. Kalantari, A. Labbaci, L. Licero-Villanueva, J. Livsey, G. Maneas, K.L. McCurley Pisarello, D. Moshir Pahlani, S. Palomino-Ángel, R. Price, C. Ricaurte-Villota, L. Fernanda Ricaurte, V. H. Rivera-Monroy, A. Rodríguez, E. Rodríguez, J. Salgado, B. Sannel, S. Seifollahi-Aghmiuni, M. Simard, Y. Sjöberg, P. Terskii, J. Thorslund, D.A. Zamora and J. Jarsjö. 2021. Hydro-climatic changes of wetlandscapes across the world. *Sci. Rep.*, 11, 2754. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81137-3>
- Alongi, D. 2015. The impact of climate change on mangrove forests. *Curr. Clim. Change Rep.*, 1: 30–39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Andrews, T.J., B.F. Clough and G.J. Muller. 1984. Photosynthetic gas exchange and carbon isotope ratios of some mangroves in North Queensland. In: Teas, H.J. (Ed). *Physiology and management of mangroves. Tasks for vegetation science*, vol. 9. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6572-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6572-0_2)
- Arias, P., G. Ortega, L.D. Villegas and A. Martínez. 2021. Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 100: 75-96. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43068102007>
- Armentano, T.V., R.F. Doren, W.J. Platt and T. Mullins. 1995. Effects of hurricane Andrew on coastal and interior forests of southern Florida: Overview and synthesis. *J. Coast. Res., Spec. Iss.*, 21: 111-114. <http://www.jstor.org/stable/25736004>
- Ball, M.C., M.J. Cochrane and H.M. Rawson. 1997. Growth and water use of the mangroves *Rhizophora apiculata* and *R. stylosa* in response to salinity and humidity under ambient and elevated concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant Cell Environ.*, 20: 1158-1166. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-144.x>
- Blanco-Libreros, J.F. and K. Ramírez-Ruiz. 2021. Threatened mangroves in the Anthropocene: habitat fragmentation in urban coastscapes of *Pelliciera* spp. (Tetrameristaceae) in northern South America. *Front. Mar. Sci.* 8:670354. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.670354>
- Botero, L. and H. Salzwedel. 1999. Rehabilitation of the Ciénaga Grande de Santa Marta, a mangrove-estuarine system in the Caribbean coast of Colombia. *Ocean Coast. Manag.*, 42(2–4): 243-256. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(98\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(98)00056-8)
- Bunting, P., A. Rosenqvist, L. Hilarides, R.M. Lucas, N. Thomas, T. Tadono, T.A. Worthington, M. Spalding, N.J. Murray and L. M. Rebelo. 2022. Global mangrove extent change 1996–2020: Global Mangrove Watch Version 3.0. *Remote Sens.*, 14: 3657. <https://doi.org/10.3390/rs14153657>
- Carpenter, S.R., B.H. Walker, J.M. Anderies and N. Abel. 2001. From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 4: 765-781. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>
- Castellanos, G., E. Casella, H. Tavera, L.A. Zapata and M. Simard. 2021. Structural characteristics of the tallest mangrove forests of the American continent: A comparison of ground-based, drone and radar measurements. *Front. For. Glob. Change*, 4: 732468. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.732468>
- Church, J., J. Hunter, K. McInnes and N. White. 2004. Sea level rise and the frequency of extreme events around the Australian coastline. In *Coast to Coast '04 – Conf. Proc., Australia's Nat. Coast. Conf., Hobart, 19-23 April 2004*. 8 p.
- Correa, C.A., A. Etter, J. Díaz-Timte, S. Rodríguez, W. Ramírez and G. Corzo. 2020. Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecol. Indic.*, 117: 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Dahdouh-Guebas, F., J. Hugé, G.M.O. Abuchahla, S. Cannicci, L.P. Jayatissa, J.G. Kairo, S.K. Arachchilage, N. Koedam, T.W.G.F. Mafaziya, N. Mukherjee, M. Poti, N. Prabakaran, H.A. Ratsimbazafy, B. Satyanarayana, M. Thavanayagam, K.V. Velde and D. Wodehouse, 2021. Reconciling nature, people and policy in the mangrove social-ecological system through the adaptive cycle heuristic. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 248: 106942. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106942>
- Duke, N.C., J.M. Kovacs, A.D. Griffiths, L. Preece, D.J.E Hill, P. Oosterzee, J. Mackenzie, H.S Morning and D. Burrows. 2017. Largescale dieback of mangroves in Australia's Gulf of Carpentaria: A severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. *Mar. Freshw. Res.*, 678: 1816–1829. <https://doi.org/10.1071/mf16322>
- Ellison, J. 2010. Vulnerability of Fiji's mangroves and associated coral reefs to climate change. A Review. Suva, Fiji, WWF South Pacific Office, 50 p. [https://awsassets.panda.org/downloads/review\\_of\\_fiji\\_s\\_mangroves\\_web\\_version.pdf](https://awsassets.panda.org/downloads/review_of_fiji_s_mangroves_web_version.pdf)
- Ellison, J.C. and D.R. Stoddart. 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications. *J. Coast. Res.*, 7: 151-165. <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/78431>
- Emery, W. J. and R.E. Thompson. 2014. *Data analysis methods in physical oceanography*. 3rd Edition. Amsterdam: Elsevier.
- Enfield, D.B. 2001. Evolution and historical perspective of the 1997–1998 El Niño–Southern Oscillation Event. *Bull. Mar. Sci.*, 69(1): 7-25. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/umrsmas/bullmar/2001/00000069/00000001/art00003#>
- Fick, S.E. and R.J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Internat. J. Climat.*, 37(12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Field, C.D. 1995. Impacts of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia*, 295(1-3): 75-81. <https://doi.org/10.1007/BF00029113>
- Fiedler, P. and L. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Ocean.*, 69: 143-180. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2006.03.008>
- Garcés-Ordóñez, O. y M. Bayona. 2019. Impactos de la contaminación por basura marina en el ecosistema de manglar de la Ciénaga Grande de Santa Marta Caribe colombiano. *Rev. Mar. Cost.*, 11(2): 145–165. <https://doi.org/10.15359/revmar.11-2.8>
- Garcés-Ordóñez, O., J.F. Saldarriaga-Vélez and L.F. Espinosa-Díaz. 2021. Marine litter pollution in mangrove forests from Providencia and Santa Catalina islands, after Hurricane IOTA path in the Colombian Caribbean. *Mar. Poll. Bull.*, 168: 112471. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112471>
- Garcés-Ordóñez, O., M. Ríos Mármol, L.J. Vivas-Aguas, L.F. Espinosa-Díaz, D. Romero-D' Achiardi and M. Canals. 2023. Degradation factors and their environmental impacts on the mangrove ecosystem of the Mallorquin Lagoon, Colombian Caribbean. *Wetlands*, 43: 85. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01731-1>



- Gilman, E., H. Van Lavieren, J. Ellison, V. Jungblut, E. Adler, L. Wilson, F. Areki, G. Brighthouse, J. Bungitak, E. Dus, M. Henry, M. Kilman, E. Matthews, I. Sauni Jr., N. Teariki-Ruatu, S. Tukia and K. Yuknavage. 2006. Pacific island mangroves in a changing climate and rising sea. Unep Regional Seas Reports and Studies No. 179. Nairobi, Kenya. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11812/rsrs179.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Giri, C. and J. Long. 2016. Is the geographic range of mangrove forests in the conterminous United States really expanding? *Sensors*, 16(12): 2010. <https://doi.org/10.3390/s16122010>
- Giri, C., E. Ochieng, L.L. Tieszen, Z. Shu, A. Singh, T. Loveland, J. Masek and N. Duke. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecol. Biogeogr.*, 20: 154-159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- González J.L. and I.D. Correa. 2001. Late Holocene evidence of coseismic subsidence on the San Juan Delta, Pacific coast of Colombia. *J. Coast. Res.*, 17(2): 459-467. <http://www.jstor.org/stable/4300196>
- Hickey, S.M., B. Radford, J.N. Callow, S.R. Phinn, C.M. Duarte and C.E. Lovelock. 2021. ENSO feedback drives variations in dieback at a marginal mangrove site. *Sci. Rep.*, 11: 8130. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87341-5>
- Ideam. 2019. Estudio nacional del agua 2018. Bogotá. 452 p.
- Ideam, PNUD, MADS, DNP, Cancillería. 2017. Tercera comunicación nacional de Colombia a la Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Bogotá.
- Invemar. 2000. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Un enfoque de manejo adaptativo. Inf. Téc. Final 2001. Min. Medio Amb.–Banco Interam. Des.–Invemar, Santa Marta.
- Invemar. 2013. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2012. Ser. Publ. Per., 8.
- Invemar. 2017. Elaboración del análisis de vulnerabilidad marino costera e insular ante el cambio climático para el país. Inf. Téc. Final – 001. 256 p. [https://alfresco.invemar.org.co/share/s/JtVO02-EQ4KQUxh4\\_4S81w](https://alfresco.invemar.org.co/share/s/JtVO02-EQ4KQUxh4_4S81w)
- Invemar. 2018. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Inf. Téc. Final 2018, Vol. 17. Santa Marta. 178 p.
- Invemar. 2021. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2020. Ser. Publ. Per., 3. <https://www.invemar.org.co/documents/10182/0/Informe+del+estado+de+los+ambientes+marinos+y+costeros+2020/2bc6da3c-71ae-4271-a9a9-38130e8c7951>
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contr. Working Groups I, II and III, Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change. Pachauri, R.K. and L.A. Meyer (Eds) IPCC, Geneva. 151 p. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr>
- IPCC. 2022. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contr. Working Group II, Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change. Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds). Cambridge Univ.. Cambridge, UK. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jaramillo, F., L. Licero, I. Ahlen, S. Manzoni, J.A. Rodríguez-Rodríguez, A. Guittard, A. Hylin, J. Bolaños, J. Jawitz, S. Wdowinski, O. Martínez and L.F. Espinosa. 2018. Effects of hydroclimatic change and rehabilitation activities on salinity and mangroves in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Wetlands*, 38: 55–767. <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1024-7>
- Kjerfve, B., U. Seeliger and L.D. De Lacerda. 2001. A summary of natural and human-induced variables in coastal marine ecosystems of Latin America. In: Seeliger, U. and B. Kjerfve (Eds). *Coastal marine ecosystems of Latin America*. Ecol. Stud., 144. Springer, Berlin, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04482-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04482-7_24)
- Larkin, N.K. and D.E. Harrison. 2005. Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L13705. <https://doi.org/10.1029/2005GL022860>
- Leal, M. and M. Spalding (Eds). 2022. The state of the world’s mangroves 2022. Global Mangrove Alliance.
- Legendre, P. and L. Legendre. 1998. Numerical ecology. Second Edition. Elsevier, Amsterdam.
- Li, S., P. Chen, J. Huang, M. Hsueh, L. Hsieh, C. Lee and H. Lin. 2018. Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Glob. Chang. Biol.*, 24: 4195–4210. <https://doi.org/10.1111/gcb.14322>
- Lovelock, C. and R. Reef. 2020. Variable impacts of climate change on blue carbon. *One Earth*, 3: 195-211. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010>
- Lovelock, C., K. Krauss, M. Osland, R. Reef and M. Ball. 2016. The physiology of mangrove trees with changing climate. In: Goldstein, G. and L. Santiago (Eds). *Tropical tree physiology*. Vol. 6. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_7)
- Macreadie, P.I., M.D.P. Costa, T.B. Atwood, D.A. Friess, J.J. Kelleway, H. Kennedy, C.E. Lovelock, O. Serrano and C.M. Duarte. 2021. Blue carbon as a natural climate solution. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2: 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- McKee, K. and W.C. Vervaeke. 2018. Will fluctuations in salt marsh–mangrove dominance alter vulnerability of a subtropical wetland to sea-level rise?. *Glob. Change Biol.*, 24: 1224–1238. <https://doi.org/10.1111/gcb.13945>
- McKee, K.L., K.W. Krauss and D.R. Cahoon. 2021. Does geomorphology determine vulnerability of mangrove coasts to sea-level rise? In: Sidik, F. and D.A. Fries (Eds). *Dynamic sedimentary environments of mangrove coasts*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816437-2.00005-7>
- McLeod, E. and R. Salm. 2006. Managing mangroves for resilience to climate change. IUCN, Gland, Switzerland. 64 p. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2006-041.pdf>
- Morton, R.A., J.L. González, G.I. López and I.D. Correa. 2000. Frequent non-storm washover of barrier islands, Pacific coast of Colombia. *J. Coast. Res.*, 16(1): 82-87. <http://www.jstor.org/stable/4300013>
- Murillo-Sandoval, P., L. Fatoyinbo and M. Simard. 2022. Mangroves cover change trajectories 1984-2020: The gradual decrease of mangroves in Colombia. *Front. Mar. Sci.*, 9:892946. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.892946>


- Ning, Z.H., R.E. Turner, T. Doyle and K.K. Abdollahi. 2003. Integrated assessment of the climate change impacts on the Gulf Coast region. Gulf Coast Climate Change Assess. Council. (GCRCC) and Louis. State Univ. Graphic Serv. 236 p. <https://www.cakex.org/documents/integrated-assessment-climate-change-impacts-gulf-coast-region>
- Olson, D.M. and E. Dinerstein. 2002. The global 200: priority ecoregions for global conservation. *Ann. Missouri Bot. Gard.*, 89: 199–224. <https://doi.org/10.2307/3298564>
- Parques Nacionales Naturales. 2018. Actualización plan de manejo Parque Nacional Natural Sanquianga 2018-2023. Parques Nacionales Naturales de Colombia. <https://www.parquesnacionales.gov.co/wp-content/uploads/2020/10/plan-de-manejo-pnn-sanquianga.pdf>
- Pelckmans, I., J.P. Belliard, O. Gourgue, L.E. Domínguez-Granda and S. Temmerman. 2024. Mangroves as nature-based mitigation for ENSO-driven compound flood risks in a river delta. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28: 1463–1476. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1463-2024>
- Perea-Ardila, M. y P. Murillo-Sandoval. 2022. La ganancia de manglar y sus implicaciones en el reservorio de carbono del Parque Nacional Natural Sanquianga en Colombia. *Ecosistemas*, 31(3): 2386. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2386>
- Poveda, G. and O.J. Mesa. 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 1675–1678. <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., P. Waylen and R. Pulwarty. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Pal.*, 234: 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Poveda, G., J. Vélez, O.J. Mesa, A. Cuartas, J. Barco, R. Mantilla, J.F. Mejía, C. Hoyos, J. Ramírez, L. Ceballos, M. Zuluaga, P. Arias, B. Botero, M. Montoya, J.D. Giraldo and D. Quevedo. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *J. Hyd. Eng.* 12:4–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4))
- Restrepo, J.D. and A. Kettner. 2012. Human induced discharge diversion in a tropical delta and its environmental implications: The Patía River, Colombia. *J. Hydrol.*, 424–425: 124–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.037>
- Restrepo, J.D. and B. Kjerfve. 2000. Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. *J. Geol.*, 108(1): 17–33. <https://doi.org/10.1086/314390>
- Restrepo, J.D., B. Kjerfve, I.D. Correa and J. González. 2002. Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan River, Pacific coast of Colombia. *Mar. Geol.*, 192(4): 355–381. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00579-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00579-0)
- Rodríguez-Rodríguez, J.A., P.C. Sierra-Correa, M.C. Gómez-Cubillos and L.V. Villanueva. 2018. Mangroves of Colombia. In: Finlayson, C., G. Milton, R. Prentice and N. Davidson (Eds). *The wetland book*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3\\_280](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_280)
- Sandilyan, S. and K. Kathiresan. 2012. Mangrove conservation: A global perspective. *Biodivers. Conserv.*, 21: 3523–3542. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0388-x>
- Simard, M., T. Fatoyinbo, C. Smetanka, V.H. Rivera-Monroy, E. Castaneda, N. Thomas and T. Van der stocken. 2019. Global mangrove distribution, aboveground biomass, and canopy height. ORNL DAAC, Oak Ridge, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1665>
- Simard, M., T. Fatoyinbo, N. Thomas, A. Stovall, A. Parra, M.W. Denbina and I. Hajnsek. 2023. A global map of mangrove canopy height with a spatial resolution of 12-meters. ORNL DAAC, Oak Ridge, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2251>
- Snedaker, S.C. 1995. Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia*, 295: 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00029109>
- Spalding, M. D., H.E. Fox, G.R. Allen, N. Davidson, Z.A. Ferdaña, M. Finlayson, B.S. Halpern, M.A. Jorge, A. Lombana, S.A. Lourie, K.D. Martin, E. McManus, J. Molnar, C.A. Recchia and J. Robertson. 2007. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *Bioscience*, 57: 573–583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
- Spalding, M., A. McIvor, F.H. Tonneijck, S. Tol and P. van Eijk. 2014. Mangroves for coastal defence. Guidelines for coastal managers & policy makers. *Wetlands International, The Nature Conservancy*. 42 p. <https://www.nature.org/media/oceansandcoasts/mangroves-for-coastal-defence.pdf>
- Trenberth, K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 308: 1753–1754. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1112551>
- Unep-Nairobi Convention/Usaid/Wiomsa. 2020. Guidelines on mangrove ecosystem restoration for the Western Indian Ocean Region. Unep, Nairobi, 71 p. <https://www.nairobiconvention.org/CHM%20Documents/WIOSAP/guidelines/GuidelinesonMangroveRestorationForTheWIO.pdf>
- UNESCO. 1992. Coastal systems studies and sustainable development. Report COMAR Inter. Scient. Conf. UNESCO, Paris, 21–25 May 1991. 276 p. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000112571>
- Ward, R., D. Friess, R. Day and R. Mackenzie. 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosyst. Health Sustain.*, 2(4): e01211. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1211>
- West, R.C. 1956. Mangrove swamps of the Pacific coast of Colombia. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 46: 98–121. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1956.tb01498.x>
- Worthington, T.A., D.A. Andradi-brown, R. Bhargava, C. Buelow, P. Bunting, C. Duncan, L. Fatoyinbo, D.A. Fries, L. Goldberg, L. Hilarides, D. Lagomasino, E. Landis, K. Longley-Wood, C. E. Lovelock, N. J. Murray, S. Narayan, A. Rosenqvist, M. Sievers, M. Simard, N. Thomas, P. Van Eijk, C. Zganjar and M. Spalding. 2020. Harnessing big data to support the conservation and rehabilitation of mangrove forests globally. *One Earth*, 2(5): 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.04.018>




## Impacto de la alimentación automática sobre la calidad del suelo en cultivo de *Litopenaeus vannamei*

### Impact of automatic feeding on soil quality in *Litopenaeus vannamei* cultivation

Erick Méndez-Macias<sup>1,2\*</sup> y Geovanna Parra-Riofrío<sup>1,2,3\*</sup>

 0000-0002-0677-1514

 0000-0001-5400-2181

1. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, 090601 Guayaquil, Ecuador. erick.mendezm@ug.edu.ec\*, geovanna.parrar@ug.edu.ec

2. Laboratorio de Acuicultura, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, 090601 Guayaquil, Ecuador.

3. Departamento de Acuicultura, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile.

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes para una acuicultura sustentable es el manejo adecuado del alimento, para lo cual la mejor estrategia es la implementación de alimentadores automáticos que permiten optimizar las raciones de alimento y optimizar el rendimiento productivo. El presente estudio evaluó el impacto de la alimentación automática sobre la calidad del suelo en el cultivo de *Litopenaeus vannamei* en tres piscinas experimentales en un periodo de tres meses; se evaluaron las cantidades de materia orgánica, carbono orgánico, pH, nitrógeno y la relación carbono-nitrógeno (C/N) para discernir si existen diferencias en los puntos de alimentación y de tipo pulmón. En los análisis finales no se observaron diferencias estadísticas ( $p \geq 0.05$ ) entre los puntos de alimentación y entre las piscinas. Estos resultados demuestran que la alimentación automática no provoca cambios en la calidad del suelo en el cultivo de *L. vannamei*.

**PALABRAS CLAVES:** materia orgánica, carbono orgánico, pH, nitrógeno, C/N.

#### ABSTRACT

One of the most important aspects for sustainable aquaculture is the proper management of feed, for which the best strategy is the implementation of automatic feeders that allow optimizing feed rations and optimizing productive performance. The present study evaluated the impact of automatic feeding on soil quality in the cultivation of *Litopenaeus vannamei* in three experimental pools in a period of three months; where were evaluated the amount of organic matter, organic carbon, pH, nitrogen and the carbon-nitrogen ratio (C/N) to evaluate if there are differences in the feeding and lung-type zones. In the final analyzes no statistical differences ( $p \geq 0.05$ ) were observed in the parameters between the feeding areas and between the pools. These results demonstrate that automatic feeding does not cause changes in soil quality in the cultivation of *L. vannamei*.

**KEYWORDS:** organic matter, organic carbon, pH, nitrogen, C/N.

## INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país con una enorme producción de camarón (López, 2016), que representa 90 % de su sector acuícola y es uno de los principales sustentos económicos del país (Gonzabay *et al.*, 2021). El camarón blanco *Litopenaeus vannamei* es el principal crustáceo cultivado a nivel mundial y tiene gran importancia para la seguridad alimentaria. El desarrollo de este crustáceo en cultivo depende de factores como calidad de agua y suelo, variables físico-químicas y alimentación (Gonzabay *et al.* 2021), este último es uno de los aspectos económicos principales, superando 50 % de los costos de producción totales (Castro y Ordinola, 2021).

En el suelo de los piscinas camaroneras los aportes de nitrógeno y fósforo, que ingresan principalmente por alimento no consumido y heces, se degrada en el sedimento y se incorpora a la columna de agua afectando todo el sistema ecológico ya que forman sustratos anaeróbicos (Zhu *et al.*, 2016; Juárez *et al.*, 2021). Debido al impacto negativo de la acuicultura sobre el medio ambiente se deben buscar formas para convertirla en una actividad sostenible y para esto se deben mejorar los procesos a través de la tecnología para disminuir los costos ambientales y de producción, especialmente en el alimento (Guevara *et al.*, 2022). Una de estas estrategias ha sido la implementación de alimentadores automáticos lo cual permite disminuir la pérdida de alimento que se concentra en el sedimento, mejorar la tasa de conversión alimenticia y reducir costos (FAO, 2020).

Sin embargo, la utilización de los alimentadores automáticos puede tener impactos negativos sobre la calidad del suelos (Beltrán, 2017), dado que existe el riesgo de que en los puntos de alimentación, el alimento balanceado no sea consumido en su totalidad, generando zonas específicas de acumulación de materia orgánica y deteriorando la calidad del suelos (Rojas *et al.*, 2017; Gilbert, 2021). Por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto que tiene la alimentación automática en la calidad del suelo de un cultivo de *Litopenaeus vannamei* durante un ciclo de cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue en una finca camaronera ubicada en el km 18 vía a la Costa en el sector Chongón (607400.00 m E y 9756200.00 m S), cerca de la ciudad de Guayaquil, Provincia del Guayas (Figura 1).

## INTRODUCTION

Ecuador is a country with a vast shrimp production (López, 2016), which represents 90 % of its aquaculture sector and is one of the main economic supports of the country (Gonzabay *et al.*, 2021). The whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* is the main crustacean cultivated around the world and is of great importance for food security. The development of this crustacean during cultivation depends on factors such as water and soil quality, physicochemical variables, and feeding (Gonzabay *et al.*, 2021). The latter is one of the most relevant economic aspects, exceeding 50 % of the total production costs (Castro and Ordinola, 2021).

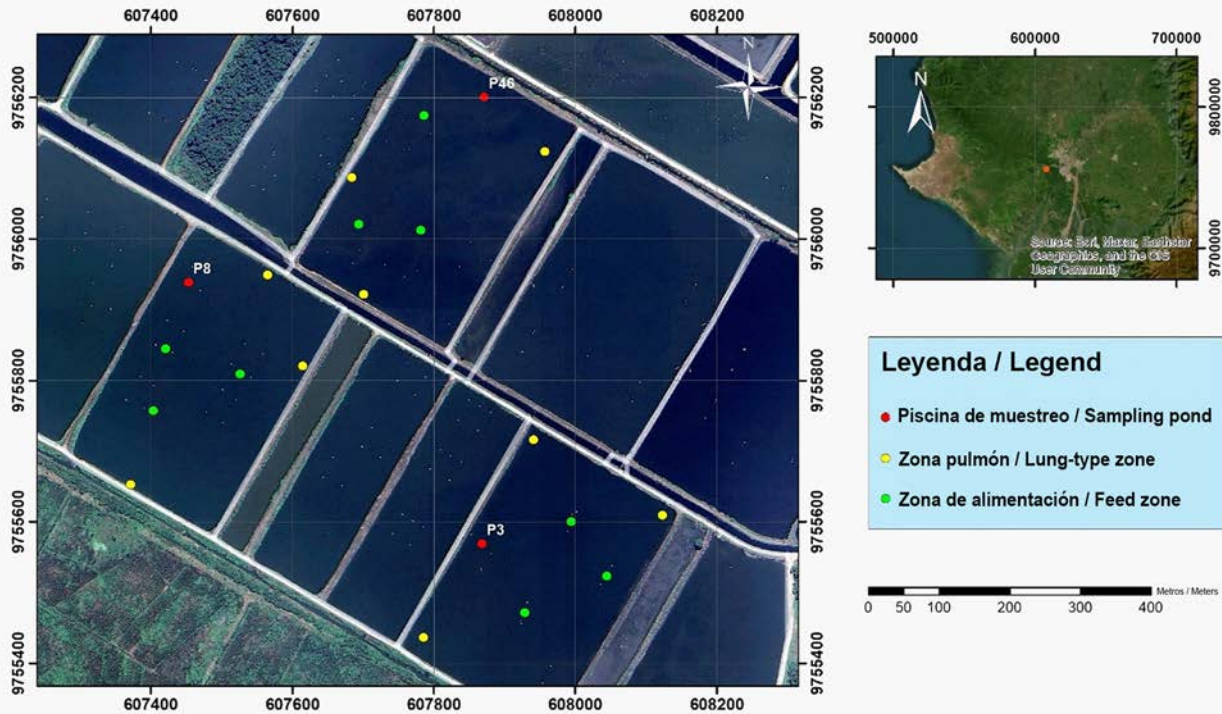
In the soil of shrimp ponds, nitrogen and phosphorous contributions – which mainly enter through unconsumed feed and feces – is degraded in the sediment and incorporated to the water column, affecting the entire ecological system, as this forms anaerobic substrates (Zhu *et al.*, 2016; Juárez *et al.*, 2021). Given its negative impact on the environment, ways to transform aquaculture into a sustainable activity must be sought. To this effect, the processes involved should be improved by means of technology, in order to reduce environmental and production costs, especially with regard to feed (Guevara *et al.*, 2022). One of these strategies has been the implementation of automatic feeders, which allows reducing the loss of feed concentrating in the sediment, as well as improving the feed conversion rate and reducing costs (FAO, 2020).

However, the use of automatic feeders can have negative impacts on soil quality (Beltrán, 2017), as there is a risk that the balanced feed is not completely consumed at the feeding points, which entails specific areas of organic matter accumulation, thereby deteriorating soil quality (Rojas *et al.*, 2017; Gilbert, 2021). Therefore, the objective of this study was to evaluate the impact of automatic feeding on the soil quality of a *Litopenaeus vannamei* culture over one cultivation cycle.

## MATERIALS AND METHODS

The study area corresponded to a shrimp farm located in km 18 of the road to the coast [Vía a la Costa] in the Chongón sector (607400.00 m E and 9756200.00 m S), near the city of Guayaquil, Guayas province (Figure 1).

### Localización del área de estudio / Location of area of study



**Figura 1.** Mapa de ubicación del área de estudio, puntos rojos muestran las piscinas de muestreo, puntos amarillos y verdes indican las muestras tomadas en los puntos pulmón y de alimentación, respectivamente.

**Figure 1.** Map of the location of the study area. Red dots show the sampling ponds. Yellow and green dots indicate the samples taken in the lung-type and feeding zones, respectively.

La camaronera tiene un total de 550 ha, las piscinas utilizadas para el ensayo fueron P3 (18.7 ha), P8 (17 ha) y P46 (17.5 ha); la época del cultivo fue durante marzo-junio de 2023 equivalente a un período lluvioso, las piscinas P3, P8 y P46 tuvieron una densidad de siembra de 155000 animales/ha, cosecha final de 95500; 93496 y 101000 animales/ha y sobrevivencia de 62 %; 60 % y 65 %, respectivamente. La alimentación automática fue de tipo sónico, con alimentadores Eruvaka de capacidad de tolva de 125 kg y radio de dispersión de  $13 \pm 2$  m, la periodicidad fue multirración a saciedad de los individuos.

Se obtuvieron muestras de sedimento durante la siembra y cosecha en tres piscinas durante un ciclo de cultivo en dos zonas, la primera fue en una ubicación cercana a un alimentador automático (zona de alimentación) y la segunda fuera del radio de dispersión de los alimentadores automáticos (zona pulmón). Se realizó una toma directa de 1 kg de sedimento y se guardó en bolsas herméticas de polietileno, la extracción de las muestras se realizó en puntos cercanos a los alimentadores automáticos ( $n = 3$ ) y en la zona pulmón ( $n = 3$ ). En las muestras de sedimentos se analizaron:

The shrimp farm spans a total of 550 ha. The ponds used during testing were P3 (18.7 ha), P8 (17 ha), and P46 (17.5 ha). The cultivation period went between March and June 2023, which corresponded to a rainy period. The P3, P8, and P46 ponds had a stocking density of 155000 animals/ha; a final harvest of 95000, 93496, and 101000 animals/ha; and a survival rate of 62, 60, and 65 %, respectively. Automatic feeding was of the sonic type, using Eruvaka feeders with a hopper capacity of 125 kg and a dispersion radius of  $13 \pm 2$  m. The feeding frequency was multi-ratio to the satiety of the individuals.

Sediment samples were obtained during stocking and harvesting in three ponds over a cultivation cycle in two zones. The first zone was located near an automatic feeder (feeding zone), and the second one was outside the automatic feeders' dispersion radius (lung-type zone). 1 kg of sediment were directly taken and stored in airtight polyethylene bags. Sample extraction was carried out at points near automatic feeders ( $n = 3$ ) and in the lung-type zone ( $n = 3$ ). In the sediment samples, the following parameters were analyzed: pH (Skoog *et al.*, 1992), total nitrogen (Kjeldahl, 1883),

pH (Skoog *et al.*, 1992), nitrógeno total (Kjeldahl, 1883), materia orgánica (Davies, 1974) y carbono orgánico según el método NMX-AA-021, 1985.

Los resultados se analizaron a través del software Statistica (V.7). Se realizó un análisis de varianza de una vía (Anova), para determinar las diferencias significativas entre las tomas de muestras antes y después para los puntos de alimentación y pulmón para las variables materia orgánica, carbono orgánico, pH, nitrógeno total, C/N. Se realizó un test *a posteriori* de Tukey para identificar diferencias entre los grupos. La homogeneidad de las varianzas se comprobó a través del test de Levene y se consideró una significancia estadística de  $p < 0.05$ .

## RESULTADOS

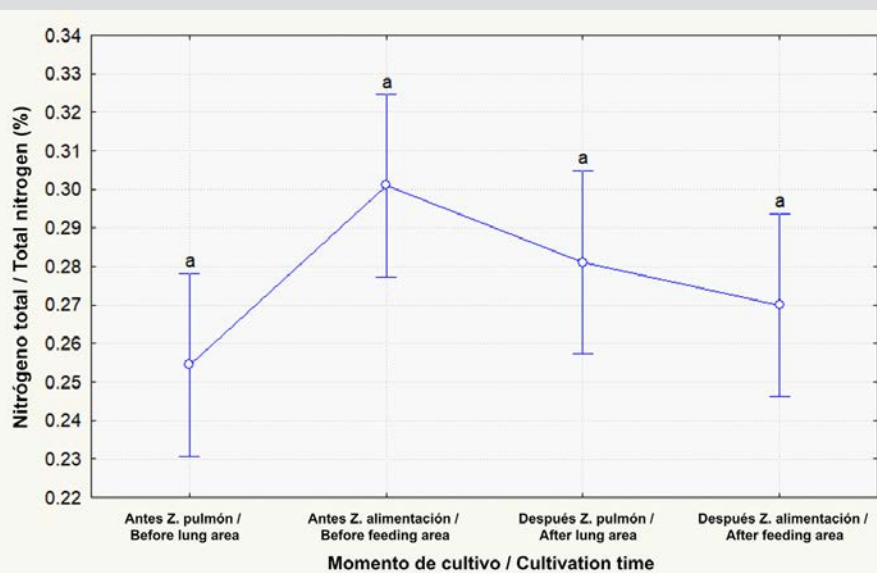
El porcentaje de carbono orgánico no mostró diferencias estadísticas entre las áreas tipo pulmón y alimentación tanto antes como después del cultivo de *L. vannamei* (Figura 2;  $p \geq 0.05$ ); el porcentaje de carbono orgánico se incrementó en 0.3 % en la zona pulmón después de finalizar el cultivo, pero en la de alimentación hubo una disminución de 0.04 %, pero sin mostrar diferencias significativas (Figura 2;  $p \geq 0.05$ ). Respecto al porcentaje de materia orgánica, no existieron diferencias entre los puntos pulmón y alimentación en ambos periodos del cultivo (Figura 3;  $p \geq 0.05$ ); en el pulmón el porcentaje de materia orgánica

organic matter (Davies, 1974), and organic carbon according to the NMX-AA-021 method (1985).

The results were analyzed using the Statistica (V.7) software. A one-way analysis of variance (Anova) was performed to identify significant differences in pre- and post-cultivation sampling for the feeding and lung-type zones regarding the following variables: organic matter, organic carbon, pH, total nitrogen, and C/N. An *a posteriori* Tukey test was carried out in order to identify differences between groups. Variance homogeneity was validated via the Levene test, considering a statistical significance of  $p < 0.05$ .

## RESULTS

The organic carbon percentage showed no statistical differences between feeding and lung-type areas both before and after *L. vannamei* cultivation (Figure 2;  $p \geq 0.05$ ). This percentage increased by 0.3 % in the lung-type zone after cultivation ended, but, in the feeding area, there was a 0.04 % decrease, albeit showing no significant differences (Figure 2;  $p \geq 0.05$ ). As for the organic matter percentage, there were no differences between the lung-type and feeding zones in both cultivation periods (Figure 3;  $p \geq 0.05$ ). In the lung-type zone, this percentage increased from 3.1 to 3.2, and, in the feeding area, it decreased from 3.4 to 3.1, albeit with no significant differences ( $p \geq 0.05$ ; Figure 3). Regarding the pH, no significant differences



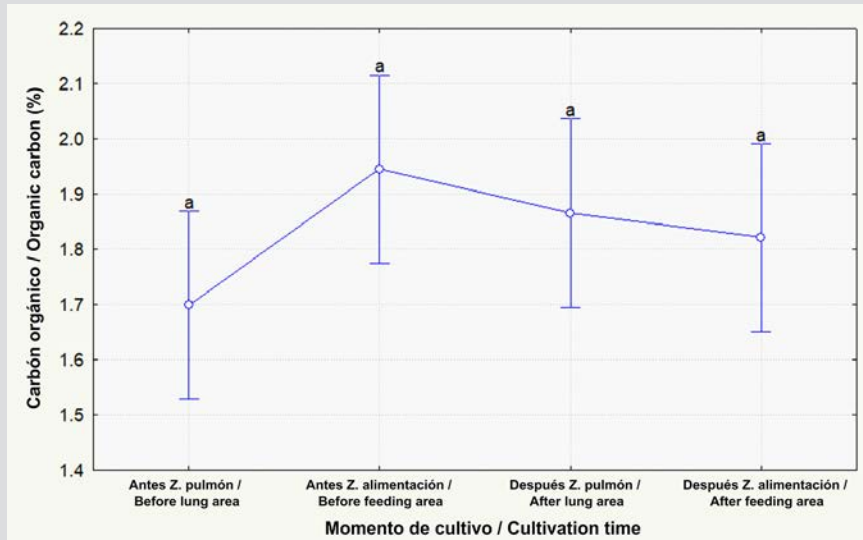
**Figura 2.** Porcentaje del carbono orgánico antes y después del cultivo de *L. vannamei* en las áreas tipo pulmón y alimentación. Los datos representan el promedio  $\pm$  error estándar ( $n = 3$ ). Letras distintas indican diferencias significativas (Anova, test Tukey  $p < 0.05$ ).

**Figure 2.** Organic carbon percentage before and after *L. vannamei* cultivation in lung-type and feeding zones. The data represent the average  $\pm$  standard error ( $n = 3$ ). Different letters indicate significant differences (Anova, Tukey test,  $p < 0.05$ ).



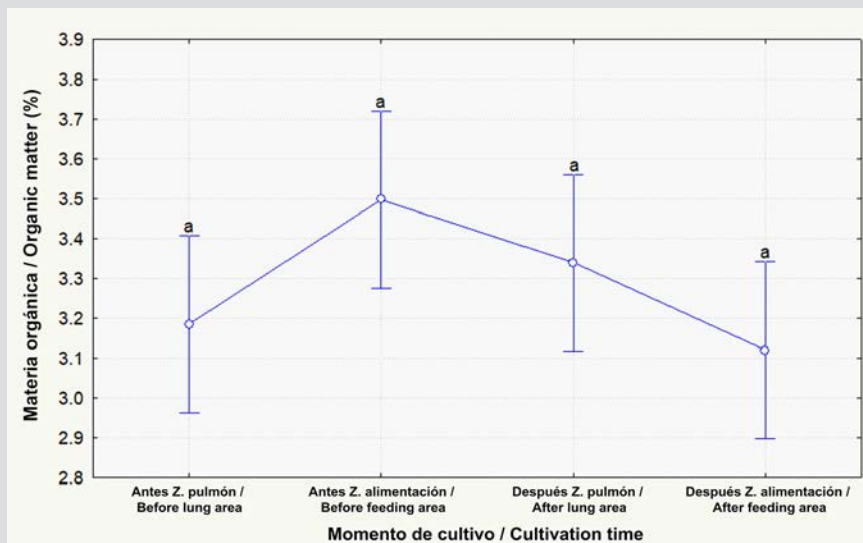
aumentó de 3.1 a 3.2 y en la zona de alimentación disminuyó de 3.4 a 3.1, pero sin diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ; Figura 3). En la variable pH se observó que no hay diferencias significativas antes y después del cultivo respecto a las zonas pulmón y alimentación ( $p \geq 0.05$ ; Figura 4); sin embargo, al finalizar el cultivo, en el punto pulmón el pH aumenta 0.41 y en la de alimentación 0.20 unidades, pero sin diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ).

were observed before and after cultivation in the lung-type and feeding zones ( $p \geq 0.05$ ; Figure 4). However, when cultivation ended, the pH at the lung-type point increased by 0.41, as well as by 0.20 in the feeding area, albeit with no significant differences ( $p \geq 0.05$ ).



**Figura 3.** Porcentaje de materia orgánica antes y después del cultivo de *L. vannamei* respecto a las áreas tipo pulmón y alimentación. Los datos representan el promedio  $\pm$  error estándar ( $n = 3$ ). Letras distintas indican diferencias significativas (Anova, test Tukey  $p < 0.05$ ).

**Figure 3.** Organic matter percentage before and after *L. vannamei* cultivation for the lung-type and feeding areas. The data represent the average  $\pm$  standard error ( $n = 3$ ). Different letters indicate significant differences (Anova, Tukey test,  $p < 0.05$ ).

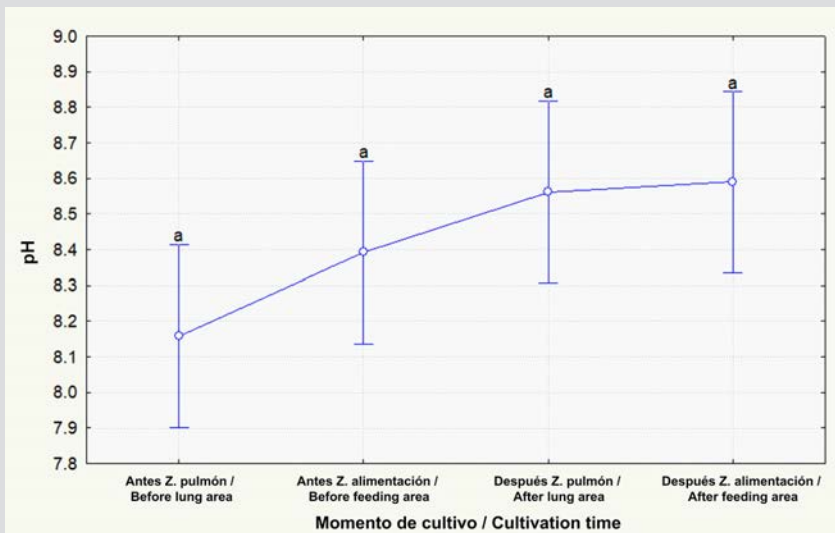


**Figura 4.** Niveles de pH de las tres piscinas antes y después del cultivo de *L. vannamei* respecto a las zonas de tipo pulmón y alimentación. Los datos representan el promedio  $\pm$  error estándar ( $n = 9$ ). Letras distintas indican diferencias significativas (Anova, test Tukey  $p < 0.05$ ).

**Figure 4.** pH levels in the three ponds before and after *L. vannamei* cultivation for the lung-type and feeding zones. The data represent the average  $\pm$  standard error ( $n = 9$ ). Different letters indicate significant differences (Anova, Tukey test,  $p < 0.05$ ).

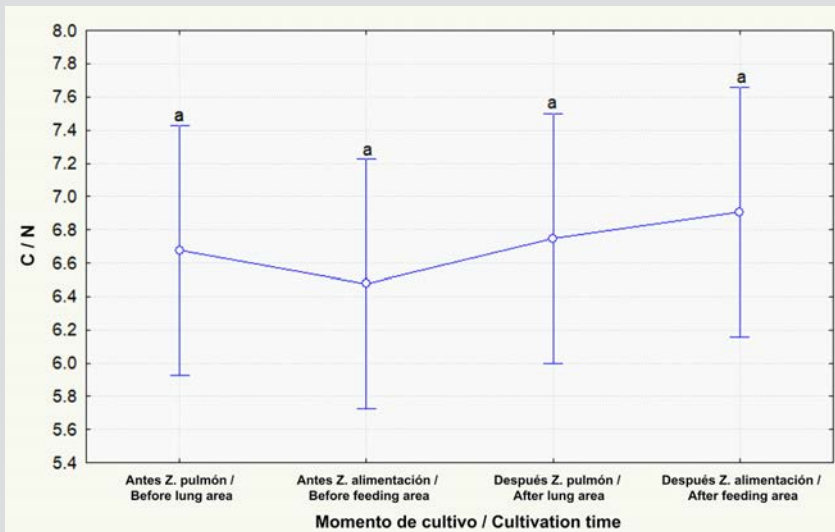
El porcentaje de nitrógeno total tampoco mostró diferencias entre las áreas pulmón y alimentación (Figura 5;  $p \geq 0.05$ ). En la figura 6 se observa que no existieron diferencias significativas con respecto a la relación C/N entre las áreas pulmón y alimentación antes y después del cultivo de *L. vannamei* ( $p \geq 0.05$ ); los niveles de concentración en la pulmón fueron similares siendo de 6.6 y 6.7, mientras en la de alimentación hubo un incremento de 6.4 a 6.9, pero sin diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ).

The total nitrogen percentage also showed no differences between the lung-type and feeding areas (Figure 5;  $p \geq 0.05$ ). Figure 6 indicates that there were no significant differences regarding the C/N ratio between lung-type and feeding areas before and after *L. vannamei* cultivation ( $p \geq 0.05$ ). The concentration levels in the lung-type area were similar (*i.e.*, 6.6 and 6.7), whereas, in the feeding zone, they increased from 6.4 to 6.9, albeit with no significant differences ( $p \geq 0.05$ ).



**Figura 5.** Porcentaje de nitrógeno total antes y después del cultivo de *L. vannamei* respecto a los puntos de tipo pulmón y alimentación. Los datos representan el promedio  $\pm$  error estándar ( $n = 3$ ). Letras distintas indican diferencias significativas (Anova, test Tukey  $p < 0.05$ ).

**Figure 5.** Total nitrogen percentage before and after *L. vannamei* cultivation at the lung-type and feeding points. The data represent the average  $\pm$  standard error ( $n = 3$ ). Different letters indicate significant differences (Anova, Tukey test,  $p < 0.05$ ).



**Figura 6.** Relación carbono-nitrógeno (C/N) antes y después del cultivo *L. vannamei* respecto a las zonas tipo pulmón y alimentación. Los datos representan el promedio  $\pm$  error estándar ( $n = 3$ ). Letras distintas indican diferencias significativas (Anova, test Tukey  $p < 0.05$ ).

**Figure 6.** Carbon-nitrogen (C/N) ratio before and after *L. vannamei* cultivation in the lung-type and feeding areas. The data represent the average  $\pm$  standard error ( $n = 3$ ). Different letters indicate significant differences (Anova, Tukey test,  $p < 0.05$ ).

## DISCUSIÓN

Esta investigación pudo determinar que el porcentaje de la materia orgánica fluctuó entre 3.12 y 3.49 %. Estos valores son diferentes a los obtenidos por Jewel *et al.* (2021), quienes determinaron una concentración de  $2.39 \pm 0.06$  de carbono orgánico en cultivo de camarón blanco. Esta diferencia puede ser atribuida a los recambios de agua (2.5 m) diarios que se efectuaron en la investigación antes mencionada, mientras que en esta fue de 2 m diarios, lo que disminuyó la cantidad de materia orgánica que puede sedimentarse. Por el contrario, Islam *et al.* (2016) encontraron valores que fluctuaron entre 4.81 y 6.59 %, posiblemente estos valores altos se debieron a que el cultivo tuvo una duración de 12 meses, superior al período de cultivo de este estudio tres meses, lo que afectaría la capacidad de sedimentación de la materia orgánica.

En cuanto al porcentaje de carbono orgánico sus valores se hallaron entre 1.69 %, y 1.94 %, los cuales difieren de los obtenidos por Mustafa *et al.* (2018), quienes registraron porcentajes entre 2.19 y 5.22. El nivel alto de carbono orgánico de la investigación antes mencionada puede estar asociado al tiempo de un año que duró el cultivo aumentando la capacidad de sedimentación; por otro lado, Anna y Dinesh (2021) obtuvieron valores bajos de 1.28 % de carbono orgánico sin el uso de alimentadores automáticos. Sin embargo, los resultados de este estudio muestran valores cercanos, lo que podría indicar que en tres meses de cultivo y una densidad de siembra de 15 animales/m<sup>2</sup> no se observa una acumulación significativa de materia orgánica.

Los resultados del análisis del pH concuerdan con los valores obtenidos en el estudio realizado por Vinothkumar *et al.* (2018), en el cual esta variable fue en aumento durante las dos etapas del cultivo con valores que corresponden a 7.8 y 8.3, antes y después de la cosecha. Por su parte, en el presente proyecto el pH fluctuó entre 8.15 y 8.59, mientras que Islam *et al.* (2016) obtuvieron un pH entre 6.22 y 8.58 durante todo el periodo de cultivo; dicha fluctuación se explica porque las piscinas estaban en una zona inundable por el efecto de las mareas. En el presente estudio las piscinas no están en áreas inundables, el nivel de agua fue controlado con recambios diarios de 2 m, lo cual pudo influir que las variaciones de pH no sean amplias, puesto que hubo una renovación constante.

En cuanto al porcentaje de nitrógeno total observado fue menor a lo encontrado por Vinothkumar *et al.* (2018), en la fase del pre-cultivo, el cual obtuvo 0.63 % siendo

## DISCUSSION

This research could determine that the organic matter percentage fluctuated between 3.12 and 3.49 %. These values are different from those obtained by Jewel *et al.* (2021), who observed an organic carbon concentration of  $2.39 \pm 0.06$  in whiteleg shrimp cultivation. This difference can be attributed to the daily water exchanges (2.5 m) that were carried out in the aforementioned study, in contrast to this study's 2 m per day, which reduced the amount of organic matter that could be sedimented. On the other hand, Islam *et al.* (2016) found values that fluctuated between 4.81 and 6.59 %. These high values might be due to the fact that the cultivation period lasted 12 months, which is higher than that of this study (three months), thus affecting the organic matter's sedimentation capacity.

As for the organic carbon percentage, the values were between 1.69 and 1.94 %, differing from those obtained by Mustafa *et al.* (2018), who recorded percentages between 3.19 and 5.22. The high organic carbon levels reported in the aforementioned research may be associated with the duration of the cultivation period (one year), which increased the sedimentation capacity. On the other hand, Anna and Dinesh (2021) obtained low organic carbon values (1.28 %) without the use of automatic feeders. Nevertheless, the results of this study show similar values, likely indicating that, over three months of cultivation and with a stocking density of 15 animals/m<sup>2</sup>, no significant organic matter accumulation is observed.

The results of the pH analysis agree with the values obtained in the study conducted by Vinothkumar *et al.* (2018), who reported an increase in this variable over the two cultivation stages, with values corresponding to 7.8 and 8.3 before and after harvesting. In this project, the pH fluctuated between 8.15 and 8.59, whereas Islam *et al.* (2016) obtained values between 6.22 and 8.22 throughout the cultivation period. This fluctuation is explained by the fact that the ponds were in a floodable area due to the effect of the tides. In this work, the ponds were not located in floodable areas; the water level was controlled via daily water exchanges of 2 m. This could have influenced the fact that the pH variations were not wide, since there was constant renewal.

The total nitrogen percentage observed was lower than that found by Vinothkumar *et al.* (2018) in the pre-cultivation phase, these authors obtained 0.63 %, more than two times the values obtained in this research. However,

más del doble de lo obtenido en la actual investigación. Sin embargo, esos mismos autores al final del cultivo registraron que el porcentaje de nitrógeno total fue de 0.35 %, valor cercano a lo que se obtuvo en este proyecto (0.30 %); esto puede atribuirse al hecho que en el estudio de Vinothkumar *et al.* (2018), se utilizaron fertilizantes ricos en nitrógeno para promover el crecimiento de algas antes de comenzar el cultivo, lo que provocó un aumento inicial del porcentaje de nitrógeno. Durante el tiempo que transcurrió hasta la cosecha, el nitrógeno tuvo que ser asimilado por los microorganismos hasta quedar en valores entre 0.05 y 0.4 %; según Mustafa *et al.* (2018), las concentraciones mencionadas se pueden hallar en el sedimento después de finalizar e iniciar un ciclo de cultivo de *L. vannamei* en una piscina.

Por otra parte, un estudio realizado por Poersch *et al.* (2020) obtuvo concentraciones menores a 0.07 % de nitrógeno total en piscinas; esas concentraciones estarían influenciadas por la cantidad de carbono orgánico y al alto grado de porosidad del sedimento. Además, determinaron que la constante aireación artificial sumada al contenido arenoso predominante en el sedimento pudo haber mejorado la descomposición de la materia orgánica, evitando la acumulación de carbono en el sedimento. En esta investigación la cantidad de carbono orgánico fluctuó entre 1.69 a 1.94, lo que en conjunto con una estructura porosa menor del suelo podría explicar que el contenido de nitrógeno total fluctuará entre 0.25 y 0.30, ya que de acuerdo con Pelletier *et al.* (2011) una mayor porosidad aumenta el proceso de volatilización del nitrógeno.

En cuanto a estudios de relación C/N en sedimentos de piscinas, hay información escasa que se puede utilizar para realizar comparaciones con el presente estudio; la mayor parte de los trabajos donde se han realizado análisis de C/N están relacionados a sistemas biofloc. Algunos autores como Xu *et al.* (2022) han realizado experimentos con diferentes concentraciones de C/N en los que han obtenido como resultado una mejor asimilación de compuestos nitrogenados ( $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN, TAN) cuando las relaciones C/N aumentaron de 8:1 a 16:1; además otros autores como Xu *et al.* (2016) y Panigrahi *et al.* (2018) experimentaron el efecto de diferentes relaciones C/N para reducir las concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), nitrógeno total (TN) y nitrógeno amoniacal total (TAN), obteniendo como resultado mejores tasas de reducción al aumentar las concentraciones en la relación, siendo más favorable relaciones C/N de 20:1.

Sin embargo, Boyd *et al.* (2001), sugieren que relaciones superiores a 10:1 en el sedimento son adecuadas para evitar una descomposición acelerada de la materia

after cultivation, they recorded a total nitrogen percentage of 0.35 %, a value close to that of this project (0.30 %); this can be attributed to the fact that, in the study by Vinothkumar *et al.* (2018), nitrogen-rich to promote algae growth before cultivation started, this caused an increase in the initial nitrogen percentage. During the time that elapsed until harvest, nitrogen had to be assimilated by microorganisms, resulting in values between 0.05 and 0.4 %; according to Mustafa *et al.* (2018), the aforementioned concentrations can be found in the sediment after completing and starting an *L. vannamei* cultivation cycle in a pond.

On the other hand, a study conducted by Poersch *et al.* (2020) obtained total nitrogen concentrations lower than 0.07 % in ponds; these concentrations could be influenced by the amount of organic carbon and the sediment's high degree of porosity. In addition, said authors determined that constant artificial aeration, coupled with the predominantly sandy contents of the sediment, could have enhanced the decomposition of organic matter, preventing the accumulation of carbon in the sediment. In this research, the amount of organic carbon fluctuated between 1.69 and 1.94, which, together with a less porous soil structure, could explain the total nitrogen content's fluctuation between 0.25 and 0.30, given that, according to Pelletier *et al.* (2011), a greater porosity enhances the nitrogen volatilization process.

As for studies on the C/N ratio in pond sediments, usable information for use in comparisons with this study is scarce; most of the works that have conducted C/N analyses are related to biofloc systems. Some authors like Xu *et al.* (2022) have performed experiments with different concentrations of C/N, obtaining a better understanding of assimilation of nitrogenated compounds ( $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN, TAN) when increasing C/N ratios from 8:1 to 16:1; in addition, other authors such as Xu *et al.* (2016) and Panigrahi *et al.* (2018) experimented with the effect of different C/N ratios to reduce the concentrations of nitrates ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), nitrites ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), total nitrogen (TN), and total ammonia nitrogen (TAN), reporting better reduction rates when increasing the concentrations in the ratio, with the most favorable being the 20:1 C/N ratio.

The relationships presented in this study agree with Boyd (1995), who found ratios between 6:1 and 12:1 in pond souls, albeit lower than those reported by Boyd *et al.* (2001). These authors suggest that ratios higher than 10:1 in sediments are adequate for preventing an accelerated decomposition of organic matter and the occurrence of parasitic nematodes, even though they



orgánica y aparición de nemátodos parásitos. Sin embargo, Boyd (1995) señaló que relaciones C/N que se encuentran en suelos de piscinas entre 6:1 a 12:1 están dentro de los resultados hallados en la presente investigación, la cual encontró relaciones C/N de 6:1, justificando que las piscinas experimentales de este estudio estén dentro del rango aceptable, pero con una baja tasa de reducción de compuestos nitrogenados si se le compara con un sistema biofloc (Xu *et al.*, 2016, 2022; Panigrahi *et al.*, 2018). Con base a lo observado en las anteriores investigaciones se infiere que la relación C/N de 6:1 hallada en el presente estudio, según lo explicado por Boyd (1995), justifica que las piscinas experimentales se encuentren dentro del rango óptimo para una correcta mineralización de la materia orgánica.

## CONCLUSIONES

La alimentación automática no provoca cambios en la calidad del suelo del cultivo de *L. vannamei* entre las zonas de alimentación y pulmón con respecto al antes y después del cultivo: no se observaron diferencias significativas en el porcentaje de carbono orgánico, materia orgánica, pH y nitrógeno total lo que conllevó a que la relación carbono-nitrógeno no muestre variación con los alimentadores automáticos manteniéndose en niveles adecuados para los procesos de mineralización de la materia orgánica.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo camaronero Granmar por permitir el análisis de sus datos y piscinas para la presente investigación.

provide a low nitrogenated compounds reduction rate when compared against a biofloc system (Xu *et al.*, 2016, 2022; Panigrahi *et al.*, 2018). Based on that observed in previous research, it is inferred that the C/N ratio of 6:1 found in this study, according to Boyd (1995), demonstrates that the experimental ponds are within the optimal range for an adequate mineralization of organic matter.

## CONCLUSIONS

Automatic feeding does not cause changes in soil quality before and after the cultivation of *L. vannamei* in both feeding and lung-type areas. No significant differences were observed in the organic carbon percentage, organic matter, pH, and total nitrogen, leading the carbon-nitrogen ratio to show no variations related to automatic feeders, reporting adequate levels for the mineralization of organic matter.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Granmar shrimp group for allowing us to analyze their data and ponds within the framework of this research.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Acebo Plaza, M., M. Álvarez, F. Marcillo, J. Rodríguez, S. Menéndez y J. Quijano. 2018. Orientación estratégica para la toma de decisiones. Industria de Acuicultura. Ecuador. Esc. Superior Politécnica del Litoral.
- Anna, A. and K. Dinesh.. 2021. Feasibility study and seasonal variations in physico-chemical parameters of water and soil quality analysis and management of the Vannamei shrimp farms in Kerala, India. *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*, 9(6): 113-119.
- Beltrán, M. 2017. Innovación en el sector acuícola. *Ra Ximhai*, 13(3): 351-364.
- Boyd, C.E. 1995. Bottom soils sediment, and pond aquaculture. Springer, New York.
- Boyd, C.E., G. Treece, R.C. Engle, D. Valderrama, C.R. Lightner, C.R. Pantoja, J. Fox, D. Sánchez, S. Otwell, L. Garrido y V. Garrido. 2001. Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos de camarón. Métodos para mejorar la camaronicultura en Centroamérica, 30 p.
- Castro, J. y A. Ordinola. 2021. La estrategia de ayuno y realimentación, una alternativa viable para optimizar el consumo de alimento balanceado en el cultivo semi-intensivo de camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. *Rev. Inv. Vet. Perú*, 32(5): e19546.
- Davies, B. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J. Proc.*, 38(1): 150-151.
- FAO. 2020. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.

- Gilbert, R. 2021. Sistemas de alimentación: Cómo evitar la degradación del alimento en la alimentación automatizada con sistemas neumáticos. *Aqua Feed*, 24(2): 42-45.
- Gonzabay, A., H. Vite, V. Garzón y P. Quizhpe. 2021. Análisis de la producción de camarón en el Ecuador para su exportación a la Unión Europea en el periodo 2015-2020. *Pol. Con.*, 6(62), 1-9. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8094522>
- Guevara, Y., R. Terán, A. Achicanoy e Y. Maigual. 2022. Implementación de nuevas tecnologías en la acuicultura. *REVIP*, 8(1). <https://doi.org/10.22267/revip.2181.27>
- Islam, M., M. Tarek, M. Bhuyan and H. Zamal. 2016. Assessment of soil quality of coastal shrimp culture pond at Chakaria, Cox's Bazar. *J. Asiat. Soc. Bangladesh Sci.*, 42(1), 21-27.
- Jewel, M., M. Haque, M. Rahman, M. Khatun, S. Akter and M. Bhuyain M. 2021. Shrimp polyculture: An economically viable and environmentally friendly farming system in low saline coastal region of Bangladesh. *Iran. J. Fish. Sci.*, 20(6): 1649 -1663.
- Juárez, J., J. Ponce, A. Román, E. Otazo, G. Pulido, Y. Marmolejo, R. Tapia y M. Benítez. 2021. Factores técnicos del manejo de la calidad agua y sedimento en policultivo camarón-tilapia en piscinas. *Rev. MVZ Córdoba*, 27(1): e2147.
- López, J. 2016. Desarrollo de indicadores de sostenibilidad para la maricultura del Ecuador. *Rev. Int. Inv. y Doc.*, 1: 20-32.
- Kjeldahl, J. 1883. Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Z Anal Chem.* 22 (1): 366-383.
- Mustafa, A., O. Hishamuddin and C. Boyd, 2018. Physical and chemical characteristics of soil from tiger shrimp aquaculture pond at Malacca, Malaysia. *J. App. Aqua.* 30(1): 47-72
- Panigrahi, A., C. Saranya, M. Sundaram, S. Kannan, R. Das, R. Kumar, P. Rajesh and S. Otta, S. 2018. Carbon: Nitrogen (C/N) ratio level variation influences microbial community of the system and growth as well as immunity of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in biofloc based culture system. *Fish Shellfish Immunol.* , 81(1), 329-337.
- Pelletier, M., D. Campbell, K. Ho, R. Burgess, C. Audette and N. Detenbeck. 2011. Can sediment total organic carbon and grain size be used to diagnose organic enrichment in estuaries? *Environ. Toxicol. Chem.* , 30(3): 538–547.
- Poersch, L., W. Bauer, M. Kersanach, M and W. Wasielesky. 2020. Assessment of trace metals, total organic carbon and total nitrogen of a shrimp farm system in southern Brazil. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 101452. doi:10.1016/j.rsma.2020.101452
- Rojas, L., V. Tique y J. Bocanegra, J. 2017. Uso de herramientas tecnológicas en la producción piscícola: Una revisión sistemática de literatura. *Rev. Ing., Inv. Desar.*, 17(2), 47-57.
- Skoog, D., F. Holler y T. Nieman. 1992. Principios de análisis instrumental (Quinta edición): Mc Graw Hill
- Vásquez, W., M. Ingae e I. Betalleluz. 2022. Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras. *Scient. Agropec.*, 13(1), 79-96.
- Vinothkumar, R., A. Sen, A and M. Srinivasan. 2018. Analysis of bottom soil quality parameters of shrimp pond culture in modified extensive method. *JETIR*, 5(7): 123-126.
- Xu, W., T. Morris and T. Samocha. 2016. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture*, 453(1): 169-175.
- Xu, W., G. Wen, H. Su, Y. Xu, X. Hu and Y. Cao. 2022. Effect of input C/N ratio on bacterial community of water biofloc and shrimp gut in a commercial zeroExchange system with intensive production of *Penaeus vannamei*. *Microorganisms*, 10(1): 1060.
- Zhu, Z., X. Lin, J. Pan and Z. Xu. 2016. Effect of cyclical feeding on compensatory growth, nitrogen and phosphorus budgets in juvenile *Litopenaeus vannamei*. *Aquac. Res.*, 47(1): 283-289.

**RECIBIDO / RECEIVED:** 13/01/2024

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 16/05/2024



ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

## Macroalgas rojas: una alternativa ecológica para la agricultura sostenible del Ecuador

### Red macroalgae: an ecological alternative for sustainable agriculture in Ecuador

Angela Pacheco Flores-de-Valgaz<sup>1,2\*</sup>, Estefany Lema Choez<sup>3</sup>, Jaime Naranjo-Morán<sup>1</sup> y Patricia Manzano Santana<sup>3</sup>

0000-0002-7417-7218

0000-0001-6875-1212

0000-0002-4410-9337

0000-0003-3189-6455

1. Carrera de Biotecnología, Grupo de Investigaciones en Aplicaciones Biotecnológicas (GIAB); Universidad Politécnica Salesiana, Campus María Auxiliadora, Km 19.5 Vía a la Costa, P.O. Box 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador. [apachecof@ups.edu.ec](mailto:apachecof@ups.edu.ec)\*, [jnaranjo@ups.edu.ec](mailto:jnaranjo@ups.edu.ec)
2. Laboratory of Crop Protection Chemistry, Department of Plants and Crops, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, 9000 Ghent, Belgium. [angela.pachecofloresdevalgaz@ugent.be](mailto:angela.pachecofloresdevalgaz@ugent.be)
3. Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE), Campus Gustavo Galindo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Espol, Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil P.O. Box 09-01-5863, Ecuador. [ealema@espol.edu.ec](mailto:ealema@espol.edu.ec), [pmanzano@espol.edu.ec](mailto:pmanzano@espol.edu.ec).

\* Autor de correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

El empleo de compuestos bioactivos extraídos de macroalgas en forma de formulaciones agrícolas representa una tecnología emergente con gran potencial para reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos. Al presente, los extractos de algas marinas se consideran un recurso sostenible debido a su carácter biodegradable. En esta revisión se discute su potencial para reemplazar o reducir a una variedad de moléculas sintéticas en cultivos económicamente importantes, tales como fertilizantes sintéticos nitrogenados y fosfatados, reguladores del crecimiento hormonales sintéticos y plaguicidas organoclorados y organofosforados. Por la presencia de una extensa gama de sustancias bioactivas ya registradas en ciertas algas se prevén como buenos candidatos para la producción de bioformulaciones vegetales. En este sentido, el aprovechamiento comercial y biotecnológico de las macroalgas podría beneficiar la economía local. Sin embargo, pese a todo el potencial de las algas existe muy poca información de su contenido metabólico o químico total. Esta revisión bibliográfica resume información que propone el uso de las macroalgas *Kappaphycus alvarezii*, *Acanthophora spicifera* e *Hypnea spinella* dentro del sector agrícola ecuatoriano como alternativa para la reducción de pesticidas.

**PALABRAS CLAVES:** bioestimulantes, metabolitos algales/macroalgales, agroquímicos.

#### ABSTRACT

The use of bioactive compounds from macroalgae in agricultural formulations is an emerging technology with great potential to reduce dependence on synthetic agrochemicals. Currently, seaweed extracts are considered a sustainable resource due to their biodegradable nature. This review discusses their potential to replace or reduce a variety of synthetic molecules in economically important crops, such as synthetic nitrogen and phosphate fertilisers, synthetic hormone growth regulators, and organochlorine and organophosphate pesticides. Due to the presence of a wide range of bioactive substances already reported in certain algae, they are foreseen as good candidates for the production of plant bioformulations. In this sense, the commercial and biotechnological exploitation of macroalgae could benefit the local economy. However, despite the potential of algae, there is very little information on their total metabolomic or chemical content. This literature review summarises information proposing the use of the macroalgae *Kappaphycus alvarezii*, *Acanthophora spicifera* and *Hypnea spinella* in the Ecuadorian agricultural sector as an alternative for pesticide reduction.

**KEY WORDS:** biostimulants, macroalgae metabolites, agrochemicals

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1311>

Publicado por Invemar

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC

Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by Invemar

This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

## INTRODUCCIÓN

Los patógenos y plagas de cultivos son responsables de pérdidas agrícolas masivas a nivel mundial (Roy *et al.*, 2022), a esto se suma el uso continuo y creciente de productos químicos sintéticos para controlarlos, lo cual representa un riesgo constante sobre la salud humana y el medio ambiente (Shukla *et al.*, 2021). En países en vía de desarrollo, como Ecuador, la agricultura ha sido considerada enemiga del ambiente por la falta de regulaciones estrictas sobre el uso de ingredientes activos dañinos. Mientras que, en continentes como el europeo, ya comenzaron esfuerzos para suprimir el uso de agroquímicos como la estrategia de la “granja a la mesa”, que pretende, como parte de sus objetivos para 2030, reducir en 50 % el uso de plaguicidas y fertilizantes sintéticos. En consecuencia, las prácticas agrícolas sostenibles ameritarán compuestos novedosos y respetuosos con el medio ambiente que fomenten la inmunidad de las plantas contra los patógenos (European Commission *et al.*, 2020).

Se conoce que las plantas responden al ataque de patógenos de dos maneras principales: por resistencia sistémica adquirida o por resistencia sistémica inducida (Shukla *et al.*, 2021). Al presente, algunos investigadores están atrayendo la atención a estrategias sostenibles de resistencia biótica inducida mediante la aplicación de elicitores naturales (Patel *et al.*, 2018; Shukla *et al.*, 2021; Roy *et al.*, 2022). En búsqueda de nuevas estrategias de control de patógenos, en las últimas décadas la literatura menciona una elevada tendencias de uso de algas marinas por sus compuestos bioactivos presentes (Patel *et al.*, 2018; Agarwal *et al.*, 2021). Su incorporación a la producción de diversos cultivos produce una amplia gama de respuestas positivas en el sistema planta-suelo. Según Agarwal *et al.* (2021), los extractos de algas, ricos en biomoléculas, actúan como bioelicitores para mejorar la tolerancia de las plantas a las enfermedades. Agarwal *et al.* (2021) sugieren que los extractos de diversas algas estimulan mecanismos de defensa a nivel fisiológico, bioquímico y molecular, regulando las vías de señalización, la homeostasis del estrés oxidativo y la expresión de genes y enzimas defensivas. Además, modulan la microbiota de la rizosfera, reforzando la protección contra patógenos. Ali *et al.* (2021) plantean que la eficacia de estos extractos se debe a una compleja mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, no a componentes individuales, resaltando la importancia de las interacciones entre sus diversos componentes.

En España y Estados Unidos existen empresas líderes en la producción de bioestimulantes y biofertilizantes a base de algas con evidencia suficiente sobre los extractos de algas y sus propiedades antivirales, antibacterianas o antifúngicas

## INTRODUCTION

Crop pathogens and pests are responsible for massive agricultural losses worldwide (Roy *et al.*, 2022). Moreover, the continuous and increasing use of synthetic chemical products to control these issues represents a constant risk to human health and the environment (Shukla *et al.*, 2021). In developing countries such as Ecuador, agriculture has been regarded as an enemy of the environment due to the lack of strict regulations regarding the use of harmful active ingredients. Meanwhile, in continents like Europe, efforts are already underway to suppress the use of agrochemicals, as is the case of the From farm to fork strategy, which, within its objectives for 2030, aims to reduce the use of pesticides and synthetic fertilizers. In this vein, sustainable agricultural practices will merit novel and environmentally friendly compounds that foster plant immunity against pathogens (European Commission *et al.*, 2020).

It is known that plants respond to pathogen attacks in two main ways: acquired or induced systemic resistance (Shukla *et al.*, 2021). At present, some researchers are focusing their attention on sustainable induced biotic resistance strategies by means of natural elicitors (Patel *et al.*, 2018; Shukla *et al.*, 2021; Roy *et al.*, 2022). Incorporating them in the production of various crops entails a broad range of positive responses in the plant-soil system. According to Agarwal *et al.* (2021), algae extracts, which are rich in biomolecules, act as bio-elicitors to improve plants' tolerance to diseases. Agarwal *et al.* (2021) suggest that the extracts from a diversity of algae stimulate defense mechanism at the physiological, biochemical, and molecular levels, regulating signaling pathways, oxidative stress homeostasis, and the expression of defensive genes and enzymes. In addition, they modulate the rhizosphere microbiota, reinforcing protection against pathogens. Ali *et al.* (2021) posit that the efficacy of these extracts is due to a complex mixture of organic and inorganic substances, not to individual components, highlighting the importance of the interaction between an extract's diverse components.

In Spain and the United States, there are leading companies in the production of algae-based biostimulants and bio-fertilizers. These companies possess substantial evidence regarding algae extracts and their antiviral, antibacterial, or antifungal properties, making them promising substitutes for enhancing plant defenses (Roy *et al.*, 2022). In this vein, stimulating plant immunity using seaweed extracts could be a feasible strategy for naturally



que les facultan como sustitutos prometedores para mejorar las defensas en las plantas (Roy *et al.*, 2022). En este aspecto, estimular la inmunidad de las plantas usando extractos de algas marinas podría ser una estrategia viable para aumentarla de forma natural a fin de reducir el uso de plaguicidas en países agrícolas (Shukla *et al.*, 2021). Además, representan la oportunidad del desarrollo de nuevas industrias.

Las algas marinas se clasifican en tres grandes grupos que son Clorófitas (verdes), Feófitas (pardas) y Rodófitas (rojas). Estos organismos marinos son relativamente abundantes en la zona costera del Ecuador, país que cuenta con un perfil costero continental de 2860 km (Jiménez y Torres, 2023), siendo bahía de Salinas y el golfo de Guayaquil las regiones que han registrado una mayor variedad de especies (Jiménez y Torres, 2023; Valverde-Balladares y Armas, 2023). Con el fin de promover alternativas innovadoras para problemáticas actuales de los agroquímicos, el objetivo de esta revisión bibliográfica es sintetizar el potencial biotecnológico de macroalgas dentro del sector agrícola ecuatoriano con enfoque en el cultivo de *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty ex PCSilva 1996 (Solieriaceae), *Acanthophora spicifera* (M. Vahl) Børgesen 1910 (Rhodomelaceae) e *Hypnea spinella* (C. Agardh) Kützinger 1847 (Cystocloniaceae) como parte de una opción sustentable para el desarrollo de productos relacionados al mejoramiento de la calidad de los cultivos cosechados en el país.

#### Estrategia metodológica de búsqueda

Para la presente revisión se emplearon las bases de datos de Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, SciELO y Springer para la recopilación de artículos relevantes. Se hizo uso de términos claves tales como “Metabolitos en *Kappaphycus alvarezii*, *Acanthophora spicifera* y *Hypnea spinella*”, “agroquímicos en cultivos del Ecuador” y “savia de *K. alvarezii*, *A. spicifera* y *H. spinella*”. Algunas preguntas de investigación que motivaron este artículo fueron ¿Cuáles son los compuestos bioactivos presentes en macroalgas que pueden ser utilizados para mejorar la calidad de los cultivos en países agrícolas? y ¿Cuáles son los metabolitos presentes en *K. alvarezii*, *A. spicifera* y *H. spinella* que tienen posibles propiedades biopesticidas, biofertilizantes o bioestimulantes? La recopilación fue limitada para artículos de investigación publicados en idioma inglés y español en el periodo de 2002 a 2023. Los hallazgos de las últimas dos décadas sirvieron para la elaboración de una tabla y la discusión de los avances con enfoque nacional para el aprovechamiento de estas macroalgas en cultivos que emplean agroquímicos en concentraciones no aceptables.

increasing immunity while aiming to reduce the use of pesticides in agricultural countries (Shukla *et al.*, 2021). In addition, it represents an opportunity for the development of new industries.

Seaweeds are classified into three major groups: Chlorophytes (green), Phaeophytes (brown), and Rhodophytes (red). These marine organisms are relatively abundant in the coastal zone of Ecuador, a country with a coastal continental profile of 2860 km (Jiménez and Torres, 2023), where Salinas Bay and the Gulf of Guayaquil have recorded the greatest diversity of species (Jiménez and Torres, 2023; Valverde-Balladares and Armas, 2023). With the purpose of promoting innovative alternatives for the current issues with agrochemicals, this literature review aimed to synthesize the biotechnological potential of macroalgae within the Ecuadorian agricultural sector, focusing on the cultivation of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty ex PCSilva 1996 (Solieriaceae), *Acanthophora spicifera* (M. Vahl) Børgesen 1910 (Rhodomelaceae), and *Hypnea spinella* (C. Agardh) Kützinger 1847 (Cystocloniaceae) as part of a sustainable option for the development of products related to improving the quality of the crops grown in the country.

#### Methodological search strategy

For this review, the Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, SciELO, and Springer databases were used to collect relevant articles. The key terms employed (in Spanish) included “Metabolites in *Kappaphycus alvarezii*, *Acanthophora spicifera*, and *Hypnea spinella*”, “agrochemicals in Ecuadorian crops”, and “sap from *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella*”. The research questions that motivated this article were what are the bioactive compounds present in macroalgae that can be used to improve the quality of crops in agricultural countries? and what are the metabolites present in *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella* that have potential biopesticidal, biofertilizer, or biostimulant properties? The search was limited to research articles published in English and Spanish during the 2002-2023 period. The findings from the last two decades helped to elaborate a table and discuss advancements with a national focus for the utilization of the aforementioned macroalgae in crops which use agrochemicals at unacceptable concentrations.

## Generalidad de las macroalgas

Las algas marinas son uno de los componentes importantes de los productores primarios (Ali *et al.*, 2021) y desempeñan un papel clave en el ecosistema marino. Son alimento para una gran variedad de organismos, desde peces hasta mamíferos marinos. También contribuyen a la formación de arrecifes de coral y a la protección de las costas contra la erosión (Murugaiyan, 2020). Su cultivo está alineado con los principios de producción sostenible, ya que pueden mitigar cerca de 200 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>/año (FAO, 2022), sin necesidad de agua dulce ni competencia por la tierra, en relación con la producción de alimentos (Rudke *et al.*, 2020). Las algas marinas pueden reducir las concentraciones de nitrógeno y fósforo en los sistemas acuáticos, sirviendo de fuente natural de los mismos (FAO, 2022).

Las macroalgas contienen una amplia gama de compuestos químicos, destacando: polisacáridos, aminoácidos, enzimas, polifenoles, florotaninos, pigmentos vegetales, ácidos grasos insaturados, esteroides, osmoprotectores, compuestos antimicrobianos y hormonas vegetales (Agarwal *et al.*, 2021). Sin embargo, estos compuestos bioactivos pueden variar por diferentes factores como la especie, lugar de la cosecha, temporada, condiciones ambientales y el método de extracción (Matos *et al.*, 2021; Lema Ch. *et al.*, 2023). Los polifenoles y los polisacáridos que caracterizan a las algas pueden actuar como elicitores desde concentraciones bajas induciendo inmunidad contra patógenos de las plantas al reconocer patrones moleculares asociados a patógenos, los cuales pueden unirse a los receptores de reconocimiento en la membrana de la célula vegetal. Su unión al receptor en la membrana celular de la planta conduce a la activación de eventos de señalización que desencadenarán una respuesta de defensa (Shukla *et al.*, 2021). La presencia de estos compuestos bioactivos ha despertado el interés de varias empresas agroquímicas para la producción de bioestimulantes comerciales utilizando la biomasa de algas. Además, pueden mezclarse en formulaciones agrícolas que contengan urea, ácidos húmicos, sulfato de potasio y fosfato de amonio para el crecimiento y desarrollo de plantas (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021).

En el litoral de Ecuador se han identificado un total de 345 especies de algas de las cuales 13.9 % corresponden a Chlorophyta, 14.4 % a Phaeophyta y 77.7 % a Rhodophyta (Valverde-Balladares y Armas, 2023). Cada grupo contiene una diversidad de metabolitos secundarios que les otorgan múltiples propiedades que son utilizadas comercialmente para diferentes fines, incluida la agricultura (Illera-Vives *et al.*, 2020). Dentro del grupo de las algas rojas en Ecuador,

## Overview of macroalgae

Seaweeds are one of the main components of primary producers (Ali *et al.*, 2021) and play a significant role in the marine ecosystem. They serve as food for a wide variety of organisms, from fish to marine mammals. They also contribute to the formation of coral reefs and the protection of coastlines against erosion (Murugaiyan, 2020). Their cultivation aligns with the principles of sustainable production, as they can mitigate about 200 million tons of CO<sub>2</sub>/year (FAO, 2022) without the need for freshwater or competition for land regarding food production (Rudke *et al.*, 2020). Seaweeds can reduce nitrogen and phosphorus concentrations in aquatic systems, acting as a natural source of these elements (FAO, 2022).

Macroalgae contain a wide range of chemical compounds, highlighting polysaccharides, amino acids, enzymes, polyphenols, phlorotannins, plant pigments, unsaturated fatty acids, sterols, osmoprotectants, antimicrobial compounds, and plant hormones (Agarwal *et al.*, 2021). However, these bioactive compounds can vary due to factors such as the species, harvest location, season, environmental conditions, and extraction method (Matos *et al.*, 2021; Lema Ch. *et al.*, 2023). The polyphenols and polysaccharides that characterize algae can act as elicitors at low concentrations, inducing immunity against plant pathogens by recognizing molecular patterns associated with them, which can bind to recognition receptors on the plant cell membrane. Their binding to the receptor on the plant cell membrane leads to the activation of signaling events that trigger a defense response (Shukla *et al.*, 2021). The presence of these bioactive compounds has sparked the interest of various agrochemical companies for the production of commercial biostimulants using algae biomass. In addition, these compounds can be mixed into agricultural formulations containing urea, humic acids, potassium sulfate, and ammonium phosphate for plant growth and development (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021).

In the littoral of Ecuador, a total of 345 species of algae have been identified, out of which 13.9 % correspond to Chlorophyta, 14.4 % to Phaeophyta, and 77.7 % to Rhodophyta (Valverde-Balladares and Armas, 2023). Each group contains a diversity of secondary metabolites that confer multiple properties used commercially for various purposes, including agriculture (Illera-Vives *et al.*, 2020). Within the group of red algae in Ecuador, *Kappaphycus alvarezii*, *Acanthophora spicifera*, and *Hypnea spinella* are underutilized at the local level, as they primarily provide

*Kappaphycus. alvarezii*, *Acanthophora spicifera* e *Hypnea spinella* son subaprovechadas a nivel local, ya que su lucro es mayoritariamente como ficocoloide, pero le caracterizan varios metabolitos adicionales de interés biotecnológico (Tabla 1). La mayor parte de su producción se concentra en la provincia de Santa Elena, en la costa del Pacífico ecuatoriano y se destinada para Estados Unidos, Europa y Asia.

profit as phycocolloids, but they are characterized by several additional metabolites of biotechnological interest (Table 1). Most of their production is concentrated in the province of Santa Elena, on the Ecuadorian Pacific coast, and is destined for the United States, Europe, and Asia.

**Tabla 1.** Compuestos bioactivos de *K. alvarezii*, *A. spicifera* e *H. spinella*. GAE: ácido gálico equivalente, DPPH: 2,2-difenil-1-picrilhidracilo, Ps: peso seco, Pf: peso fresco o húmedo, -: no registrado

**Table 1.** Bioactive compounds from *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella*. GAE: equivalent gallic acid, DPPH: 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl. Ps: dry weight, Pf: fresh or wet weight, -: not reported.

Macroalga / Macroalgae	Molécula / Molecule	Tipo / Type	Concentración / Concentration	Referencias / References
<i>K. alvarezii</i>	Hormonas vegetales / Plant hormones	Citoquinina / Cytokinin	10.69-11.43 ppm Pf	Cokrowati <i>et al.</i> (2023)
		Auxinas / Auxins	14.27-1078.25 ppm Pf	
		Giberelina / Gibberelin	0- 0.49 ppm Pf	
	Ficocoloide / Phycocolloid	Carragenina / Carrageenan	44.77 – 63.96 % Pf	Patel <i>et al.</i> ,(2018)
	Pigmentos y aminoácidos esenciales / Pigments and essential amino acids	Clorofila / Chlorophyll	12.25- 38.01 µg/g Ps	Aminah y Xiren (2017), Brotosudarmo <i>et al.</i> (2018), Rudke <i>et al.</i> (2020) y Uju <i>et al.</i> (2020)
		β-caroteno / β-carotene	2.92- 5.72 µg/g Ps	
		Zeaxantina / Zeaxanthin	1.39- 3.21 µg/g Ps	
		Fucoxantina / Fucoxanthin	-	
		Ficoeritrina / Phycoerythrin	1.91 mg/mL Ps	
		Ficocianina / Phycocyanin	-	
		Ácidos aspárticos / Aspartic acids	4.19 mg/g Ps	
		Fenilalanina / Phenylalanine	3.02 mg/g Ps	
		Ácido glutámico / GLutamic acid	3.16 mg/g Ps	
		Leucina / Leucine	0.32-0.56 mg/100 mg Ps	
	Treonina / Threonine	0.19-0.32 mg/100 mg Ps		
	Compuestos fenólicos / Phenolic compounds	Ácido 3-hidroxibenzoico / 3-hydroxybenzoic acid	-	Baskararaj <i>et al.</i> (2020)
		Ácido gálico / Gallic acid	-	
		Ácido clorogénico / Chlorogenic acid	-	
		Ácido cinámico / Cinnamic acid	-	
		Artemiseol	-	
	Carbotioamida de hidrazina / Hydrazine carbothioamide	-		

Macroalga / Macroalgae	Molécula / Molecule	Tipo / Type	Concentración / Concentration	Referencias / References
<i>A. spicifera</i>	Hormonas vegetales / Plant hormones	Auxina / Auxin	-	Guillén <i>et al.</i> (2022)
		Giberelina / Gibberelin	157 µg/g Pf	
		Citoquinina / Cytokinin	15.3 µg/g Pf	
	Compuestos / Compounds	Fenoles / Phenols	7.84–40.58µg/mg GAE Ps	Zakaria <i>et al.</i> (2011)
	Antioxidantes / Antioxidants	DPPH	6.8–50.1 % Ps	
	Aminoácidos esenciales / Essential amino acids	Ácido aspártico / Aspartic acid	45 mg/g Ps	Ramu Ganesan <i>et al.</i> (2020)
		Ácido glutámico / Glutamic acid	76 mg/g Ps	
		Histidina / Histidine	42.6 mg/g Ps	
		Glicina / Glycine	37.54 mg/g Ps	
		Treonina / Threonine	52.3 mg/g Ps	
		Arginina / Arginine	12.6 mg/g Ps	
		Tirosina / Tyrosine	46.3 mg/g Ps	
		Metonina / Methionine	16.2 mg/g Ps	
		Isoleucina / Isoleucine	36.8 mg/g Ps	
		Lisina / Lysine	52.6 mg/g Ps	
		Alanina / Alanine	34.2 mg/g Ps	
		Fenilalanina / Phenylalanine	54.6 mg/g Ps	
		Prolina / Proline	17.8 mg/g Ps	
		Leucina / Leucine	49 mg/g Ps	
	Valina / Valine	44.5 mg/g Ps		
Ácidos grasos / Fatty acids	Cáprico / Capric	1.86 % Ps	Ramu Ganesan <i>et al.</i> (2020)	
	Decílico / Decylic	1.86 % Ps		
	Láurico / Lauric	4.39 % Ps		
	Mirístico / Myristic	3.95 % Ps		
	Pentadecíclico / Pentadecyclic	0.90 % Ps		
	Margárico / Margaric	0.50 % Ps		
	Estéarico / Stearic	2.97 % Ps		
	Laurosteárico / Laurostearic	4.39 % Ps		
	Palmítico / Palmitic	23.93 % Ps		

Macroalga / Macroalgae	Molécula / Molecule	Tipo / Type	Concentración / Concentration	Referencias / References
<i>H. spinella</i>	Isoflavonas / Isoflavones	Daidzin	1.40 ng/g Ps	Klejdus <i>et al.</i> (2010)
		Genistin	8.86 ng/g Ps	
		Ononin	24.83 ng/g Ps	
		Daidzein	7.39 ng/g Ps	
		Sissotrin	22.98 ng/g Ps	
		Genistein	13.14 ng/g Ps	
		Formononetin	13.10 ng/g Ps	
		Biochanin A	15.05 ng/g Ps	
	Polisacárido sulfatado / Sulfated polysaccharide	Fucoidanos / Fucoidans	-	Gara <i>et al.</i> (2022)
	Compuestos antioxidantes / Antioxidant compounds	Carotenoides totales / Total carotenoids	1.15 mg/g Ps	Ruiz-Medina <i>et al.</i> (2022)
		Taninos condensados / Condensed tannins	0.67 mg GAE/g Ps	
		Fenoles / Phenols	5.59 mg GAE/g Ps	
		Flavonoides / Flavonoids	1.14 mg GAE/g Ps	
		Prolina / Proline	0.5 µmol/g Ps	

A pesar de contar con condiciones climáticas tropicales favorables y extensas zonas costeras, Ecuador aún se encuentra en las primeras etapas de desarrollo en cuanto a la producción y cultivo de algas. Esto se refleja en su ausencia entre los principales productores de algas a nivel mundial (Cai *et al.*, 2021). En 2019, la producción global de algas marinas alcanzó 35.8 millones de toneladas, con la participación de 49 países y territorios (Cai *et al.*, 2021). Asia concentra 97 % de la producción mundial, mientras que en América y Europa predomina la recolección silvestre. En contraste, el cultivo es el método principal en Asia, África y Oceanía (Cai, 2021).

La incipiente producción de algas en Ecuador puede atribuirse a su corta trayectoria en el ámbito del cultivo controlado de este recurso. Sin embargo, el país cuenta con potencial para desarrollar esta actividad, como lo indica el informe de la FAO “Algas y microalgas: una visión general para liberar su potencial en el desarrollo de la acuicultura mundial” donde se menciona la producción ecuatoriana de los géneros *Kappaphycus* y *Eucheuma*, aunque con un porcentaje mundial inferior a 0.01 % (Cai *et al.*, 2021).

Despite its favorable tropical climatic conditions and extensive coastal areas, Ecuador is still in the early stages of development regarding algae production and cultivation. This is reflected in its absence among the major global algae producers (Cai *et al.*, 2021). In 2019, the global seaweed production reached 35.8 million tons, with the participation of 49 countries and territories (Cai *et al.*, 2021). Asia concentrates 97 % of the global production, whereas, in America and Europe, there is a predominance of wild harvesting. In contrast, cultivation is the main method in Asia, Africa, and Oceania (Cai, 2021).

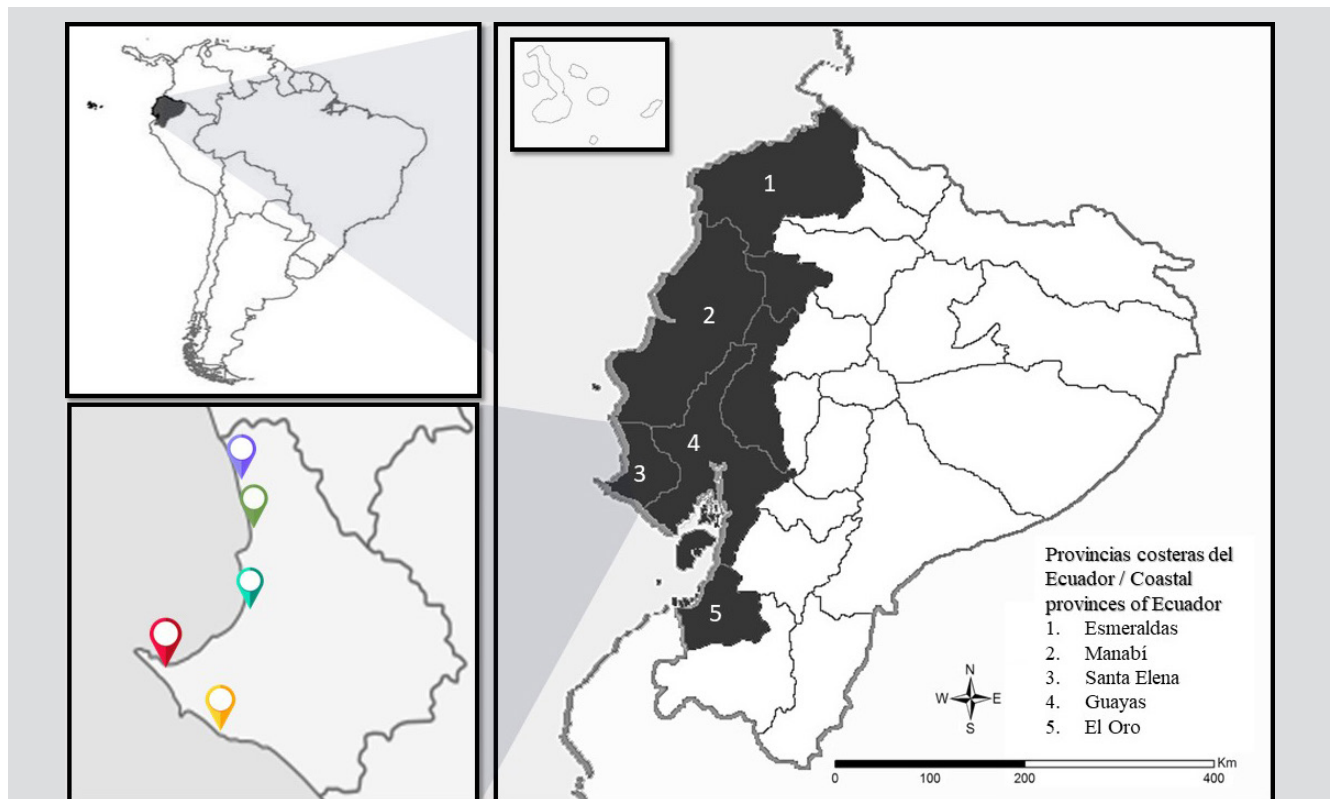
The nascent algae production in Ecuador can be attributed to its short history regarding the controlled cultivation of this resource. However, the country has the potential to perform this activity, as indicated by the FAO report titled *Algae and microalgae: An overview to unlock their potential in the development of global aquaculture*, which mentions Ecuadorian production of the genera *Kappaphycus* and *Eucheuma*, albeit with a global percentage of less than 0.01 % (Cai *et al.*, 2021).

Según Jiménez y Torres (2023), Ecuador cuenta con las condiciones apropiadas para ampliar la diversificación de la acuicultura con mayor enfoque sobre los cultivos de macroalgas, especialmente en la provincia de Santa Elena. En su investigación, se identifican al menos 10 puntos en la costa del Ecuador repartidos en cinco provincias que cumplen con características oceanográficas, ambientales, biológicas y sociales para la instalación de nuevas granjas marinas de macroalgas (Figura 1).

Investigaciones como la de Montúfar-Romero *et al.* (2023) demuestran que el crecimiento de la macroalga *K. alvarezii* en Ecuador es superior a estudios previos realizados en otras regiones tropicales y subtropicales. La tasa de crecimiento diaria obtenida en ese estudio fue de 15.2 % g.día<sup>-1</sup>, superando los datos previos tanto en el Atlántico como en Asia. Las características geográficas y las condiciones favorables para el crecimiento de las macroalgas en Ecuador, junto con los resultados prometedores de investigaciones como la de Jiménez y Torres (2023) y Montúfar-Romero *et al.* (2023), abren un panorama alentador para el desarrollo del cultivo de macroalgas en el país.

According to Jiménez and Torres (2023), Ecuador has appropriate conditions to expand its diversification of aquaculture, with a greater focus on macroalgae cultivation, especially in the province of Santa Elena. In their research, they identify at least 10 locations along the Ecuadorian coast, spread across five provinces, that meet the oceanographic, environmental, biological, and social characteristics for establishing new macroalgae marine farms (Figure 1).

Works such as Montúfar-Romero *et al.* (2023) demonstrate that the growth of the macroalgae *K. alvarezii* in Ecuador exceeds previous studies conducted in other tropical and subtropical regions. The daily growth rate obtained in that study was 15.2 % g.day<sup>-1</sup>, surpassing previous data on both the Atlantic and Asia. The geographical characteristics and favorable conditions for macroalgae growth in Ecuador, together with promising results from studies such as Jiménez and Torres (2023) and Montúfar-Romero *et al.* (2023), show an encouraging landscape for the development of macroalgae cultivation in the country.



**Figura 1.** Provincias costeras del Ecuador con parámetros oceanográficos idóneos para el cultivo de macroalgas, según Jiménez y Torres (2023).  
 ■ Santa Rosa, Salinas – principal área de cultivo de *K. alvarezii*.  
 ■ ■ ■ ■ Otros sectores en la provincia de Santa Elena con sistemas flotantes para el cultivo de macroalgas.

**Figure 1.** Coastal provinces of Ecuador with suitable oceanographic parameters for macroalgae cultivation according to Jiménez and Torres (2023).  
 ■ Santa Rosa, Salinas – main cultivation area for *K. alvarezii*.  
 ■ ■ ■ ■ Other sectors within the province of Santa Elena with floating systems for macroalgal cultivation.



### Efecto de la aplicación de bioestimulantes a base de macroalgas en diferentes cultivos

Según el boletín de Comercio Exterior (2023), las exportaciones de frutas de Ecuador han incrementado en los últimos años. En 2022, el valor de las exportaciones de frutas de Ecuador fue de \$1200 millones. Este crecimiento se debe a una serie de factores, incluyendo la creciente demanda de frutas ecuatorianas en los mercados internacionales, la mejora de la calidad de las frutas ecuatorianas y la expansión de la producción de frutas en Ecuador.

El uso de macroalgas en la agricultura sostenible es una práctica que está ganando popularidad en Ecuador. El gobierno ecuatoriano está apoyando el desarrollo de esta práctica, pues ofrece una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de la agricultura en el país. Por tal motivo es importante considerar la idoneidad y riqueza nutricional del desecho de las macroalgas rojas para emplearse en la agricultura sostenible del Ecuador.

*Kappaphycus*, *Laminaria*, *Ascophyllum*, *Enteromorpha*, *Sargassum* y *Ulva* son los géneros de macroalgas más empleados a nivel mundial para la fabricación de bioestimulantes vegetales en forma de concentrado líquido y polvo soluble (Cai *et al.*, 2021; Pandya y Mehta, 2023). Su matriz orgánica es generalmente compleja, compuesta por oligoelementos, minerales (Tabla 2), aminoácidos, lípidos, carbohidratos y hormonas promotoras (auxinas, citoquininas, giberelinas y betainas) que son responsables de las actividades elicitoras y fitoestimuladoras (Mondal *et al.*, 2015; Michalak *et al.*, 2016). Además de estos, también se utilizan otros géneros de macroalgas en la fabricación de bioestimulantes, como *Porphyra*, *Codium*, *Gracilaria* y *Chlorella* (Khan *et al.*, 2009).

**Tabla 2.** Contenido de nutrientes minerales (mg/100 g ps) de macroalgas usadas para formular bioestimulantes. Na: sodio, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, P: fósforo, S: azufre, Fe: hierro, Zn: zinc, Mn: manganeso, -: no registrado.

Macroalga / Macroalgae	Na	K	Ca	Mg	P	S	Fe	Zn	Mn	Referencias / References
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	2.23-7.91	4.10	0.84-263	0.74	0.12	11.24	11.34 – 65.94	0.29 -1.85	1.10	Suresh Kumar <i>et al.</i> (2015); Alcantara and Lazaro-Llanos, (2020)
<i>Hypnea spinella</i>	-	-	-	-	-	-	40.96	0.74	-	Rodriguez Tenorio <i>et al.</i> (2013)
<i>Acanthophora spicifera</i>	4980	1662	1495 -5820	1170	96	7920	67	9.60	6.82	Ganesan <i>et al.</i> (1991); Lawanyawut <i>et al.</i> (2002); Reka <i>et al.</i> (2017)

### Effect of applying macroalgae-based biostimulants in different crops

According to the Foreign Trade Bulletin (2023), Ecuador’s fruit exports have increased in recent years. In 2022, the value of Ecuador’s fruit exports was \$1.2 billion. This growth is due to several factors, including the increasing demand for Ecuadorian fruits in international markets, improvements in the quality of Ecuadorian fruits, and the expansion of fruit production in Ecuador.

The use of macroalgae in sustainable agriculture is a practice that is gaining popularity in Ecuador. The Ecuadorian government is supporting the advancement of this practice, as it offers an opportunity to enhance the sustainability of agriculture in the country. Therefore, it is important to consider the suitability and nutritional richness of the waste from red macroalgae for use in sustainable agriculture in Ecuador.

*Kappaphycus*, *Laminaria*, *Ascophyllum*, *Enteromorpha*, *Sargassum*, and *Ulva* are the macroalgae genera most commonly used worldwide for the manufacture of plant biostimulants in the form of liquid concentrate and soluble powder (Cai *et al.*, 2021; Pandya and Mehta, 2023). Their organic matrix is generally complex, composed of trace elements, minerals (Table 2), amino acids, lipids, carbohydrates, and promoting hormones (auxins, cytokinins, gibberellins, and betaines), which are responsible for elicitor and phyto-stimulatory activities (Mondal *et al.*, 2015; Michalak *et al.*, 2016). Other macroalgae genera are also used in the manufacture of biostimulants, such as *Porphyra*, *Codium*, *Gracilaria*, and *Chlorella* (Khan *et al.*, 2009).

**Table 2.** Mineral nutrient content (mg/100 g Dw) of macroalgae used to formulate biostimulants. Na: sodium, K: potassium, Ca: calcium, Mg: magnesium, P: phosphorus, S: sulfur, Fe: iron, Zn: zinc, Mn: manganese, -: not reported.

Macroalga / Macroalgae	Na	K	Ca	Mg	P	S	Fe	Zn	Mn	Referencias / References
<i>Ulva lactuca</i>	690–700	100–2800	790–1600	2660–2700	140–220	2540	66–180–213	19.10	2.60	Rodríguez Tenorio <i>et al.</i> (2013); Leandro <i>et al.</i> (2020)
<i>Sargassum sp.</i>	-	-	1860	687	-	-	88.60	1.35	-	Leandro <i>et al.</i> (2020)
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	-	99.65	1515–1561	-	227	-	27.82–57	0.97	8.45	Lawanyawut <i>et al.</i> (2002)
<i>Codium fragile</i>	8950	457	807	1252	-	-	26.59	0.43	8.53	Seo <i>et al.</i> (2019)
<i>Gracilaria spp.</i>	-	-	912	-	390	-	138	4.38	12.65	Ganesan <i>et al.</i> (1991), Lawanyawut <i>et al.</i> (2002)

Los extractos con base en algas se han probado en diferentes cultivos comunes en la agricultura ecuatoriana demostrando su potencial desde pequeñas dosis. Por su contenido de nutrientes, los extractos basados en algas han demostrado que las plantas tienen un mejor cuajado de las flores, rendimiento de la biomasa, germinación de las semillas y la producción de frutos, así como la vida útil posterior a la cosecha de diversos cultivos que adquieren una mayor resistencia a diferentes fitopatógenos (Mantri *et al.*, 2017). Roy *et al.* (2022) investigaron el impacto de la aplicación foliar de la savia de *K. alvarezii* en el arroz previamente infectado de la enfermedad del tizón bacteriano. En su estudio mostraron que los cultivos tratados con los extractos tenían niveles más bajos de severidad de la enfermedad y producían mayores rendimientos como resultados del aumento de las defensas antibacterianas de la planta. En otro experimento dedicado a evaluar el efecto de cuatro bioformulaciones de *K. alvarezii* en el cultivo de banano durante la etapa vegetativa y de floración, los autores observaron que la aplicación foliar a una dosis de 1 mL/L mejoró significativamente en el peso del racimo en 25.24 % sobre el control de agua (Ravi *et al.*, 2018). De igual manera, otros autores han utilizado la savia *K. alvarezii* como biofertilizante de algas marinas para promover el crecimiento, rendimiento y la mejora de la papa y el tomate (Pramanick *et al.*, 2017). Se ha registrado que la influencia de dos especies de algas marinas rojas *K. alvarezii* con *S. wightii* y *A. spicifera* con *S. vulgare* contribuyen a la mitigación de la enfermedad de mancha bacteriana y tizón temprano, al mismo tiempo que mejora las características de crecimiento del cultivo, como la altura, el número de hojas, el contenido de clorofila y el rendimiento cuando se aplicó en forma de pulverización foliar en tomate (Ali *et al.*, 2022; Vaghela *et al.*, 2023). La aspersión de savia de *Gracilaria*

Algae-based extracts have been tested on different crops common in Ecuadorian agriculture, demonstrating their potential even with small doses. Due to their nutrient content, algae-based extracts have shown plants to provide improved flower setting, biomass yield, seed germination, and fruit production, as well as enhanced post-harvest shelf life in various crops, which acquire greater resistance to different phytopathogens (Mantri *et al.*, 2017). Roy *et al.* (2022) studied the impact of the foliar application of *K. alvarezii* sap on rice previously infected with the bacterial blight disease. In their study, they showed that crops treated with extracts had lower levels of disease severity and produced higher yields as a result of increased plant antibacterial defenses. In another experiment aimed at evaluating the effect of four bioformulations of *K. alvarezii* on banana crops during the vegetative and flowering stages, it was observed that foliar application at a dose of 1 mL/L significantly improved cluster weight by 25.24 % with respect to the water control (Ravi *et al.*, 2018). Similarly, other researchers have used *K. alvarezii* sap as a seaweed biofertilizer to promote the growth, yield, and improvement of potatoes and tomatoes (Pramanick *et al.*, 2017). It has been recorded that the influence of two red seaweed species, *K. alvarezii* with *S. wightii* and *A. spicifera* with *S. vulgare*, contributes to mitigating bacterial spot and early blight disease while improving crop growth characteristics, such as height, the number of leaves, chlorophyll content, and yield, when applied as foliar spray on tomatoes (Ali *et al.*, 2022; Vaghela *et al.*, 2023). Spraying *Gracilaria spp.* with a 15 % dose of fertilizers on rice reported increased growth and improved grain and straw yields (Layek *et al.*, 2018).



spp. con una dosis de 15 % de fertilizantes en arroz, registró un aumento en el crecimiento y mejoró el rendimiento del grano y de la paja (Layek *et al.*, 2018).

Los beneficios asociados al uso de extractos de diferentes algas en los cultivos respaldan la afirmación de diversos autores (Hassan *et al.*, 2021) que posicionan a los bioestimulantes de extracto de algas como uno de los mejores promotores biológicos sostenibles del crecimiento vegetal (Tabla 3). Esta aseveración se ve reforzada por la presencia en el mercado de más de 15 productos comerciales con resultados avalados por estudios científicos rigurosos (Illera-Vives *et al.*, 2020).

The benefits associated with the use of extracts from different algae in crops support various authors' claims (Hassan *et al.*, 2021) that position algae extract biostimulants as one of the best sustainable promoters of biological growth (Table 3). This assertion is reinforced by the market presence of over 15 commercial products whose results are backed by rigorous scientific studies (Illera-Vives *et al.*, 2020).

**Tabla 3.** Aplicación de extractos de macroalgas en cultivos de consumo masivo a nivel mundial con sus principales beneficios. K<sub>2</sub>O: óxido de potasio, N<sub>2</sub>: nitrógeno molecular, N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio, Mg: magnesio, Ca: calcio, Mn: manganeso, Fe: hierro, Ca<sup>+</sup>: ion calcio, K<sup>+</sup>: ion potasio.

**Table 3.** Application of macroalgae extracts in mass-consumption crops worldwide, with their main benefits. K<sub>2</sub>O: potassium oxide, N<sub>2</sub>: molecular nitrogen, N: nitrogen, P: phosphorus, K: potassium, Mg: magnesium, Ca: calcium, Mn: manganese, Fe: iron, Ca<sup>+</sup>: calcium ion, K<sup>+</sup>: potassium ion.

Cultivo / Crop	Macroalga / Macroalgae	Presentación / Presentation	Principales beneficios / Main benefits	Referencia / Reference
Tomate / Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	<i>K. alvarezii</i>	Extracto de alga al 5 % / Algal extract at 5 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del rendimiento fresco, biomasa seca y área foliar, número de frutos por planta y el tamaño de los frutos.</li> <li>• Mayor contenido de minerales.</li> <li>• Mayor resistencia al enrollamiento de la hoja, marchitez bacteriana y barrenador del fruto.</li> <li>• Aumento de raíces y brotes.</li> </ul>	Zodape <i>et al.</i> (2011)
	<i>Sargassum</i> sp.	Extracto de alga (2.5 mg/L) / Algal extract (2.5 mg/L)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del vigor de las plántulas.</li> <li>• Efecto positivo sobre la raíz y los microbios del suelo.</li> <li>• Aumento del contenido de clorofila. /</li> <li>• Increased fresh yield, dry biomass, leaf area, number of fruits per plant, and fruit size.</li> <li>• Higher mineral content.</li> </ul>	Fatimah <i>et al.</i> (2018)
	<i>Ulva ohnoi</i>	Fertilizante en polvo de biomasa del alga / Algae biomass powder fertilizer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Greater resistance to leaf curl, bacterial wilt, and fruit borer.</li> <li>• Increase in roots and shoots.</li> <li>• Increased seedling vigor.</li> <li>• Positive effect on the root and soil microbes.</li> <li>• Increased chlorophyll content.</li> </ul>	Espinosa-Antón <i>et al.</i> (2023)
Trigo / Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	<i>K. alvarezii</i> combinado con <i>Gracilaria</i> / <i>K. alvarezii</i> combined with <i>Gracilaria</i>	Extracto concentrado (savia, 7.5 % y 5 % de cada macroalga, respectivamente) / Concentrated extract (sap, 7.5 %, and 5 % of each macroalga)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento en el rendimiento de número, peso y longitud de espigas.</li> <li>• Mayor contenido de nutrientes en los granos. /</li> <li>• Increased yield regarding spike number, weight, and length.</li> <li>• Higher nutrient content in grains.</li> </ul>	Shah <i>et al.</i> (2013)

Cultivo / Crop	Macroalga / Macroalgae	Presentación / Presentation	Principales beneficios / Main benefits	Referencia / Reference
<b>Maíz / Corn</b> ( <i>Zea mays</i> L.)	<i>Ascophyllum nodosum</i> , <i>Laminaria</i> spp	Extractos líquidos comerciales / Commercial liquid extracts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor absorción de agua y nutrientes.</li> <li>• Mayor porcentaje y tasa de germinación.</li> <li>• Aumento del vigor de las plantas. /</li> <li>• Better absorption of water and nutrients.</li> <li>• Higher germination percentage and rate.</li> <li>• Increased plant vigor.</li> </ul>	Ertani <i>et al.</i> (2018)
<b>Café / Coffee</b> ( <i>Coffea arabica</i> L.)	<i>A. nodosum</i>	Extracto líquido comercial (dosis recomendada de 1000 mL/ha para aplicación foliar) / Commercial liquid extract (recommended dose of 1000 mL/ha for foliar application)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de longitud de brotes, altura, masa fresca total, masa seca total e índice de área foliar.</li> <li>• Mayor rendimiento. /</li> <li>• Increased shoot length, height, total fresh mass, total dry mass, and leaf area index.</li> <li>• Increased yield.</li> </ul>	Pedro <i>et al.</i> , (2022)
<b>Caña de azúcar / Sugarcane</b> ( <i>Saccharum officinarum</i> L.)	<i>K. alvarezii</i> , <i>A. nodosum</i>	Extracto de <i>K. alvarezii</i> (1 %) y extracto de <i>A. nodoso</i> (dosis recomendada de 1 ml/L para aplicación foliar) / <i>K. alvarezii</i> (1 %) extract and <i>A. nodoso</i> extract (recommended dose of 1 ml/L for foliar application)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de la biomasa en las plantas.</li> <li>• Mayor rendimiento.</li> <li>• Mayor producción total de materia seca.</li> <li>• Incremento de la intensidad de clorofila en la hoja.</li> <li>• Reducción de la severidad de la enfermedad fúngica causada por <i>Colletotrichum falcatum</i>.</li> <li>• Mayor contenido de sacarosa.</li> <li>• Tolerancia al estrés por sequía. /</li> <li>• Increased plant biomass.</li> <li>• Higher yield.</li> <li>• Higher total dry matter production.</li> <li>• Increase in leaf chlorophyll intensity.</li> <li>• Reduction in the severity of the fungal disease caused by <i>Colletotrichum falcatum</i>.</li> <li>• Higher sucrose content.</li> <li>• Tolerance to drought stress.</li> </ul>	Karthikeyan and Shanmugam (2017) Raju <i>et al.</i> (2017)
<b>Mango</b> ( <i>Mangifera indica</i> L.)	<i>A. nodosum</i>	Extracto líquido (5000 ppm) / Liquid extract (5000 ppm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del rendimiento y mejora de calidad de frutos.</li> <li>• Menor riesgo de caída de frutos.</li> <li>• Mayor contenido de clorofila. /</li> <li>• Increased yield and improved fruit quality.</li> <li>• Lower risk of fruit drop.</li> <li>• Higher chlorophyll content.</li> </ul>	Dash <i>et al.</i> (2021)
<b>Manzana / Apple</b> ( <i>Malus robusta</i> )	<i>Fucus espiralis</i> , <i>Bifurcaria bifurcata</i> , <i>Codium tomentosum</i> , <i>Codium vermilara</i>	Extracto líquido (0.5 % para aplicación foliar) / Liquid extract (0.5 % for foliar application)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimización del oscurecimiento del fruto. /</li> <li>• Minimized fruit darkening.</li> </ul>	Augusto <i>et al.</i> (2016)



Cultivo / Crop	Macroalga / Macroalgae	Presentación / Presentation	Principales beneficios / Main benefits	Referencia / Reference
<b>Banana</b> ( <i>Musa sp.</i> )	<i>A. nodosum</i>	Extracto líquido (85 %), aminoácidos (6 %), K <sub>2</sub> O (5 %) y N <sub>2</sub> (2 %) / Liquid extract (85 %), aminoacids (6 %), K <sub>2</sub> O (5 %), and N <sub>2</sub> (2 %)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del peso del racimo.</li> <li>• Mejor rendimiento. /</li> <li>• Increased bunch weight.</li> <li>• Improved yield.</li> </ul>	Tabet <i>et al.</i> (2021)
<b>Papa / Potato</b> ( <i>Solanum tuberosum L.</i> )	<i>Ulva lactuca</i> , <i>Janiarubens</i> , <i>Pterocladia capillacea</i>	Extracto líquido comercial patentado (TAM®) / Patented commercial liquid extract (TAM®)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del rendimiento de producción, calidad, y características bioquímicas y fisiológicas del producto.</li> <li>• Mayor contenido de potasio en tubérculos. /</li> </ul>	Ammar <i>et al.</i> (2022)
	<i>Ecklonia maxima</i>	Bioestimulante comercial (Kelpak SL) / Commercial biostimulant (Kelpak SL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increased yield regarding the production, quality, and biochemical and physiological characteristics of the product.</li> <li>• Higher potassium content in tubers.</li> </ul>	Dziugiel and Wadas (2020)
<b>Naranja / Oranges</b> ( <i>Citrus spp.</i> )	<i>A. nodosum</i>	Extracto de alga para aplicación suplementaria exógena (0.5 ml/L + aminoácido + 0.01 % Tween 20) / Algal extract for supplementary exogenous (0.5 ml/L + amino acid + 0.01 % Tween 20)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejoras en el crecimiento, pigmentos y nutrientes de las hojas, el rendimiento y los atributos físicos y químicos de la fruta.</li> <li>• Mejora de los macro y micronutrientes foliares.</li> <li>• Aumento de la altura de las plántulas, diámetro del tallo principal, número de hojas, área foliar y contenido foliar de nitrógeno, clorofila y carbohidratos solubles totales. /</li> </ul>	Khan <i>et al.</i> (2022)
	<i>E. máxima</i>	Extracto de alga (Kelpak40, bioestimulante comercial) / Algal extract (Kelpak40, commercial biostimulant)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvements in leaf growth, pigments, and nutrients, as well as in fruit physical and chemical attributes.</li> <li>• Improvements in the foliar macro- and micronutrients</li> <li>• Increased seedling height, main stem diameter, leaf number, leaf area, and foliar nitrogen, chlorophyll, and total carbohydrate content.</li> </ul>	Hamzah <i>et al.</i> (2023)
<b>Soja / Soy</b> ( <i>Glycine max</i> )	<i>Padina minor</i> , <i>Sargassum crassifolium</i> , <i>Sargassum cristaefolium</i> , <i>Turbinaria decurrens</i>	Extractos líquidos con concentración de alga variable (0.1 %, 0.2 %, 0.3 % y 0.4 %) / Liquid extracts with variable algal concentration (0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, and 0.4 %)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de los parámetros del crecimiento vegetativo. /</li> <li>• Improved vegetative growth parameters.</li> </ul>	Noli <i>et al.</i> (2021)
<b>Frutilla / Strawberry</b> ( <i>Fragaria ananassa</i> )	<i>Sargassum spp.</i>	Extracto de alga comercial (Alga600, 4 dosis recomendadas de 0, 2, 4 and 8 g/L) / Commercial algal extract (Alga600, 4 recommended doses of 0, 2, 4, and 8 g/L)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de concentraciones de N, P, K, Mg, Ca, Mn y Fe. /</li> <li>• Increased concentrations of N, P, K, Mg, Ca, Mn, and Fe.</li> </ul>	Al-Shatri <i>et al.</i> (2020)

Cultivo / Crop	Macroalga / Macroalgae	Presentación / Presentation	Principales beneficios / Main benefits	Referencia / Reference
<b>Frutilla / Strawberry</b> ( <i>Fragaria ananassa</i> )	<i>K. alvarezii</i>	Extracto de alga (dosis recomendada de 0.75, y 1.25 mL/L durante la prefloración y cuajado) / Algal extract (recommended dose of 0.75 and 1.25 mL/L during pre-flowering and fruit set)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor extensión de la planta, mayor porcentaje de área foliar de cuajado de frutos, número de coronas, longitud y ancho del fruto, y contenido de antocianinas. /</li> <li>• Greater plant extension, higher percentage of fruit set leaf area, number of crowns, fruit length and width, and anthocyanin content.</li> </ul>	Rana <i>et al.</i> (2023)
<b>Pepino / Cucumber</b> ( <i>Cucumis sativa</i> )	<i>K. alvarezii</i>	Extracto de alga (Agrogain®, bioestimulante comercial) / Algal extract (Agrogain®, commercial biostimulant)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansión de los cotiledones del pepino.</li> <li>• Mayor actividad de amilasa.</li> <li>• Aumento del área foliar total.</li> <li>• Modulación de las vías relacionadas con el transporte de electrones y protones que ayudan a las plantas a utilizar eficientemente la radiación fotosintética para un crecimiento óptimo. /</li> <li>• Expansion of cucumber cotyledons.</li> <li>• Greater amylase activity.</li> <li>• Increased total leaf area.</li> <li>• Modulation of pathways related to the transport of electrons and protons, which help plants to efficiently utilize photosynthetic radiation for optimal growth.</li> </ul>	Shukla <i>et al.</i> (2023)
	<i>Ulva lactuca</i> , <i>Jania rubens</i> , <i>Pterocladia capillacea</i>	Bioestimulante de algas comercial (TAM®) / Commercial algal biostimulant (TAM®)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de las características químicas y físicas relacionadas con la inmunidad, la productividad y la defensa contra el estrés.</li> <li>• Improvements in the physical and chemical characteristics related to immunity, productivity, and defense against stress.</li> </ul>	Hassan <i>et al.</i> (2021)
<b>Alcachofa / Artichoke</b> ( <i>Cynara scolymus</i> L.)	<i>U. lactuca</i> , <i>U. faciata</i> , <i>Pterocladia caplicia</i>	Extracto de algas y fertilizantes de fósforo y potasio (10 mL L <sup>-1</sup> ) / Algal extract and phosphorus and potassium fertilizers (10 mL L <sup>-1</sup> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora del rendimiento total en (~40 %) y del rendimiento temprano. /</li> <li>• Improved total yield (~40 %) and early yield.</li> </ul>	Elsharkawy <i>et al.</i> (2021)
<b>Arroz / Rice</b> ( <i>Oryza sativa</i> L.)	<i>Kappaphycus</i> sp. y <i>Eucheuma</i> sp.	Extracto de algas para aplicación foliar / Algal extract for foliar application	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento de la apertura de los estomas y temperatura de las hojas bajo condiciones de estrés.</li> <li>• Reducción de especies reactivas de oxígeno, (e.g., peróxido de hidrógeno y radicales superóxidos), en plantas estresadas.</li> <li>• Aumento de los niveles de Ca<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>. /</li> <li>• Maintenance of stomatal opening and leaf temperature under stress conditions.</li> <li>• Reduction of reactive oxygen species (e.g., hydrogen peroxide and superoxide radicals) in stressed plants.</li> <li>• Increased Ca<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> levels.</li> </ul>	Banakar <i>et al.</i> (2022)

Cultivo / Crop	Macroalga / Macroalgae	Presentación / Presentation	Principales beneficios / Main benefits	Referencia / Reference
<b>Pimiento picante / Hot pepper (<i>Capsicum annuum</i>)</b>	<i>U. lactuca, J. rubens y Pcapillacea</i>	Extracto líquido de alga comercial (TAM ®, 0.25, 0.5 y 1 %) / Commercial liquid algal extract (TAM ®, 0.25, 0.5, and 1 %)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora del rendimiento y la composición de nutrientes totales.</li> <li>• Aumento clorofila, compuestos ascórbicos y fenólicos, flavonoides y nutrientes totales.</li> <li>• Mejora de la actividad antioxidante total. /</li> <li>• Improved yield and total nutrient composition.</li> <li>• Increase in chlorophyll, ascorbic and phenolic compounds, flavonoids, and total nutrients.</li> <li>• Improved total antioxidant activity.</li> </ul>	Ashour <i>et al.</i> (2021)
<b>Espinaca / Spinach (<i>Spinacia oleracea</i> L.)</b>	<i>Ecklonia máxima y Ascophyllum nodosum</i>	Bioestimulante comercial Kelpak ®, 3 mL/L y Amalgerol ®, 3 mL/L / Commercial biostimulant (Kelpak ®), 3 mL/L, and Amalgerol ®, 3 mL/L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor biosíntesis de clorofila y mejor estado mineral de las plantas,</li> <li>• Mayor rendimiento de los cultivos. /</li> <li>• Greater biosynthesis of chlorophyll and better plant mineral status.</li> <li>• Higher crop yield.</li> </ul>	Rouphael <i>et al.</i> (2018)

### Mecanismo de acción de los bioestimulantes con base en extractos de algas

Roy *et al.* (2022) evaluaron dos formulaciones de *K. alvarezii* comercial y demostraron que su aplicación foliar, antes o después de la infección, induce una respuesta defensiva antibacteriana en las plantas superior a la de las plantas sin tratamiento. Las plantas tratadas acumularon mayores niveles de ácido salicílico, una hormona defensiva clave, y exhibieron una mayor expresión de genes inmunes asociados. Además, los tratamientos con el extracto aumentaron los niveles endógenos de ácido jasmónico y citoquinina, acompañados de una mayor expresión de sus genes sensibles respectivos. Estos resultados sugieren que el extracto de *K. alvarezii* tiene un potencial significativo para mejorar las defensas de las plantas contra patógenos bacterianos.

Por otro lado, Patel *et al.* (2018) evaluaron el impacto de la savia de *K. alvarezii* en tres variedades de trigo duro de importancia comercial frente al estrés salino y por sequía durante las fases vegetativa y reproductiva. En condiciones de estrés salino, las plantas tratadas con la savia exhibieron una menor relación  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  y un mayor contenido de  $\text{Ca}^{2+}$ . Además, la savia mitigó el daño a la membrana celular al mantener un mayor contenido de agua en el tejido, reducir la fuga de electrolitos y el contenido de malondialdehído. Las especies reactivas de oxígeno, el superóxido y el peróxido también se redujeron significativamente en el tratamiento a base de *K. alvarezii*. Los osmoprotectores como proteínas totales, prolina, aminoácidos y azúcares solubles aumentaron

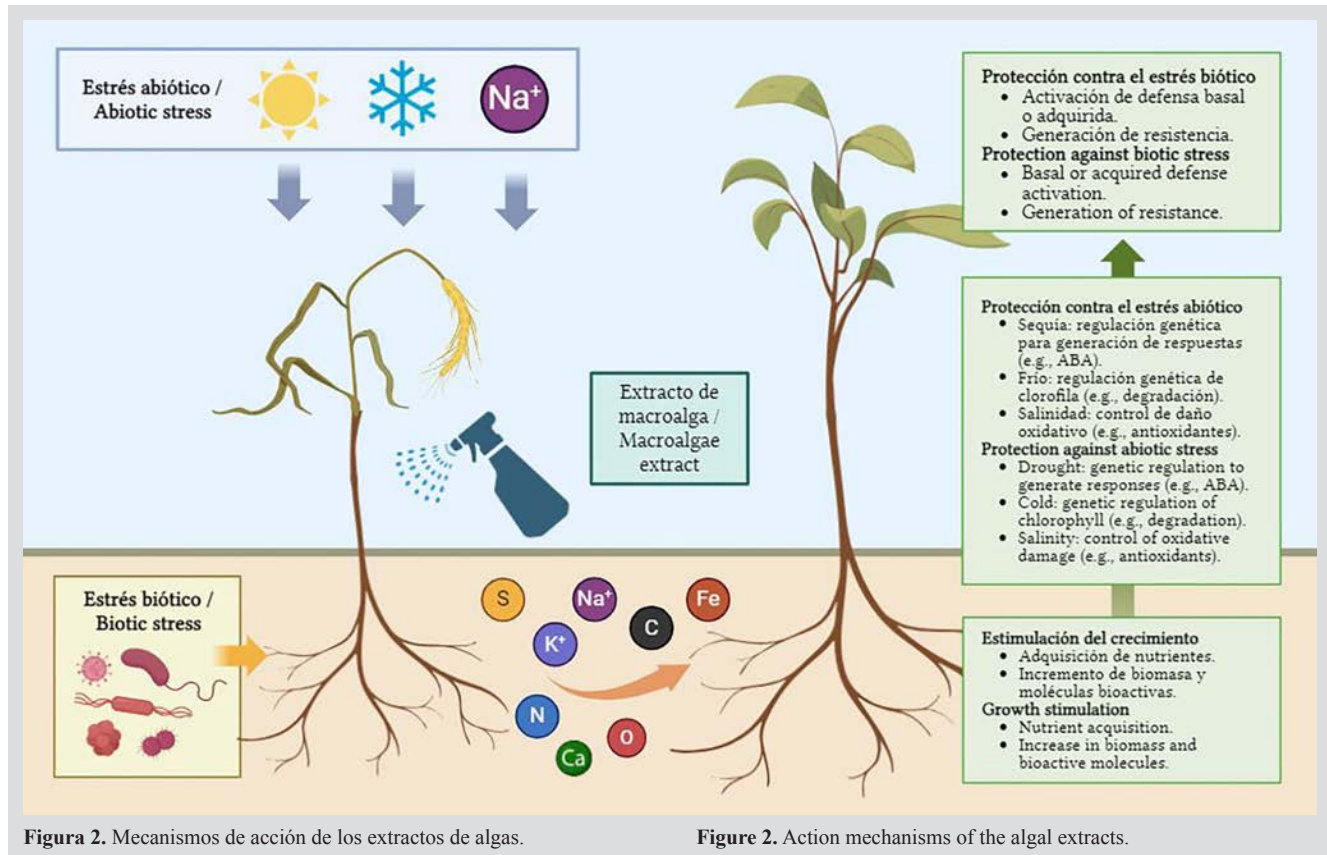
### Action mechanism algae extract-based biostimulants

Roy *et al.* (2022) evaluated two commercial formulations of *K. alvarezii* and demonstrated that their foliar application, before or after infection, induces a superior antibacterial defensive response in comparison with untreated plants. The treated plants accumulated higher levels of salicylic acid, a key defensive hormone, and exhibited a greater expression of associated immune genes. In addition, the treatments with the extract increased the endogenous levels of jasmonic acid and cytokinin, accompanied by a greater expression of their corresponding sensitive genes. These results suggest that *K. alvarezii* extract has a significant potential to enhance plant defenses against bacterial pathogens.

On the other hand, Patel *et al.* (2018) evaluated the impact of *K. alvarezii* sap on three commercially important varieties of durum wheat under saline and drought stress during vegetative and reproductive phases. Under saline stress conditions, the plants treated with the sap showed a lower  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ratio and a higher  $\text{Ca}^{2+}$  content. Moreover, the sap mitigated cell membrane damage by maintaining a higher water content in the tissue and reducing electrolyte leakage and malondialdehyde content. Reactive oxygen species, superoxide, and peroxide levels were also significantly reduced in the treatment based on *K. alvarezii*. Osmoprotectants such as total proteins, proline, amino acids, and soluble sugars increased with the application of *K. alvarezii* sap both under and in the absence of stress

con la aplicación de la savia *K. alvarezii* tanto en condiciones de estrés como sin él. Las fitohormonas (ácido abscísico, citoquinina y auxina) se regularon de forma significativa con la aplicación de la savia y también mejoró significativamente el rendimiento al aumentar el número de espigas y granos (Figura 2).

conditions. Phytohormones (abscisic acid, cytokinin, and auxin) were significantly regulated with the application of the sap, and they significantly improved the yield by increasing the number of spikes and grains (Figure 2).



Según Samuels *et al.* (2022), los extractos de algas marinas ejercen sus efectos beneficiosos en las plantas a través de tres mecanismos principales: mejor adquisición de nutrientes, inhibición de la degradación de la clorofila y el desencadenamiento de la respuesta de defensa. La aplicación de extractos de algas estimula la producción de auxinas, giberelinas y citoquininas, mejorando la absorción de nutrientes esenciales como N, P, K, Fe y Zn. Los extractos de algas, ricos en betaínas y glicina betaína, protegen las células vegetales del estrés abiótico preservando la clorofila, proteínas complejas, enzimas antioxidantes y el fotosistema II. Los polisacáridos de las paredes celulares de las algas (ulvanos, laminarinas, carragenanos) actúan como desencadenantes de la respuesta de defensa de las plantas. Se inducen mecanismos de resistencia contra patógenos mediante la acumulación de proteínas relacionadas con la patogénesis, enzimas como

According to Samuels *et al.* (2022), seaweed extracts exert their beneficial effects on plants through three main mechanisms: a better nutrient acquisition, the inhibition of chlorophyll degradation, and the triggering of defense responses. The application of seaweed extracts stimulates the production of auxins, gibberellins, and cytokinins, improving the uptake of essential nutrients such as N, P, K, Fe, and Zn. Seaweed extracts, rich in betaines and glycine betaine, protect plant cells from abiotic stress by preserving chlorophyll, complex proteins, antioxidant enzymes, and the photosystem II. The polysaccharides from algal cell walls (ulvans, laminarins, carrageenans) act as triggers for plant defense responses. Resistance mechanisms against pathogens are induced by the accumulation of pathogenesis-related proteins, enzymes such as chitinases and glucanases, and phenolic molecules. Other authors suggest that seaweed

quitinasas y glucanasas, y moléculas fenólicas. Otros autores sugieren que extractos de algas con elevado contenido en ácido indol-3-acético como *Ascophyllum nodosum* y *Laminaria* spp. son eficaz para promover los rasgos morfológicos de las raíces en maíz (Rouphael y Colla, 2020).

#### Formulaciones de extracto de algas marinas: tendencias y técnicas emergentes

Al presente, la mayoría de productos comerciales de extracto de algas están elaborados a partir de algas pardas como *Ascophyllum nodosum*, *Fucus*, *Laminaria*, *Sargassum* y *Turbinaria* spp. (Mukherjee y Patel, 2020). Sin embargo, los extractos de algas rojas de *K. alvarezii*, *A. spicifera* e *H. spinella* prometen reemplazar a una variedad de moléculas agroquímicas sintéticas (Figura 3), ya que contienen una diversidad de macronutrientes, micronutrientes y aminoácidos poco aprovechados en esta área (Murillo Carvajal y Romo González, 2021). Estos nutrientes pueden ayudar a las plantas a crecer y desarrollarse de manera saludable, lo que puede reducir la necesidad de fertilizantes químicos. Estos extractos son una fuente natural de fósforo y potasio, entre otros nutrientes, que son esenciales para el crecimiento de las plantas (Tabla 2). Estos extractos algales pueden ayudar a las plantas a absorber el nitrógeno y fósforo del suelo y trasladarlo de la raíz al brote de manera más eficiente, lo que puede reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados y fosfatados sintéticos (Pérez-Madruga *et al.*, 2020). También podrían contribuir en una reducción de contaminación del agua por nitratos.

Los extractos de algas contienen fitohormonas que ayudan a las plantas a florecer y fructificar de manera más eficiente al actuar como reguladores hormonales de crecimiento lo que puede aumentar los rendimientos de cosechas (Murillo Carvajal y Romo González, 2021). Formulaciones con estas fitohormonas pueden reducir la contaminación del medio ambiente por reguladores del crecimiento hormonales sintéticos. De forma paralela, las fitohormonas pueden ayudar a las plantas a defenderse de plagas y enfermedades, actuando como metabolitos secundarios (Udayan *et al.*, 2018). Estas fitohormonas pueden actuar como insecticidas, fungicidas y nematocidas naturales. Debido a la defensa que otorgan pueden ayudar a reducir la necesidad de plaguicidas organoclorados y organofosforados sintéticos. Esto puede ayudar a proteger a las aves y los otros animales silvestres de la exposición a estos pesticidas tóxicos.

extracts with a high content of indole-3-acetic acid, like *Ascophyllum nodosum* and *Laminaria* spp. are effective in promoting root morphological traits in maize (Rouphael and Colla, 2020).

#### Seaweed extract formulations: emerging trends and techniques

At present, most commercial seaweed extract products are elaborated from brown algae such as *Ascophyllum nodosum*, *Fucus*, *Laminaria*, *Sargassum*, and *Turbinaria* spp. (Mukherjee and Patel, 2020). However, red algae extracts from *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella* show promise in replacing a variety of synthetic agrochemical molecules (Figure 3), as they contain a diversity of macronutrients, micronutrients, and amino acids that are underutilized in this field (Murillo Carvajal and Romo González, 2021). These nutrients can help plants to grow and develop healthily, which may reduce the need for chemical fertilizers. These extracts are a natural source of phosphorus and potassium, among other nutrients essential for plant growth (Table 2). These algal extracts can help plants to absorb nitrogen and phosphorus from the soil and translocate it from the root to the shoot in a more efficient manner, which can reduce the need for synthetic nitrogenous and phosphate fertilizers (Pérez-Madruga *et al.*, 2020). They could also contribute to reducing water pollution by nitrates.

Algal extracts contain phytohormones that help plants bloom and bear fruit more efficiently by acting as hormonal growth regulators, which can increase crop yields (Murillo Carvajal and Romo González, 2021). Formulations with these phytohormones can reduce environmental pollution by synthetic hormonal growth regulators. Concurrently, phytohormones can help plants to defend against pests and diseases by acting as secondary metabolites (Udayan *et al.*, 2018). These phytohormones can act as natural insecticides, fungicides, and nematocides. Due to the defenses they provide, they can help to reduce the need for synthetic organochlorine and organophosphate pesticides. This can aid in protecting birds and other wildlife from exposure to these toxic pesticides.



Figura 3. Macroalgas del Ecuador con potencial uso en la agricultura.

Figure 3. Ecuadorian macroalgae with agricultural potential.

También, estos extractos bioactivos acondicionan el suelo con materia orgánica mejorando su estructura, contenido de oligoelementos, minerales, reguladores de crecimiento, vitaminas y otros metabolitos; en menor grado podrían mejorar la hidratación del suelo, favoreciendo el desarrollo de microorganismos benéficos (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021).

Furthermore, these bioactive extracts condition the soil with organic matter, improving its structure, trace element content, minerals, growth regulators, vitamins, and other metabolites. To a lesser extent, they could enhance soil hydration, favoring the development of beneficial microorganisms (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021). Their phenolic



Sus compuestos fenólicos tienen el potencial de favorecer el crecimiento de los cultivos, desarrollar mecanismos de defensa y contrarrestan el estrés oxidativo (Roy *et al.*, 2022). En consecuencia, son candidatos para reemplazar a una variedad de moléculas sintéticas para resolver problemas de compactación, retención de agua o salinidad.

### Métodos de extracción

Por otro lado, existen diversos métodos de extracción de los principios activos de las algas, lo cuales se basan en llegar a la ruptura celular para liberar los componentes de interés. Los nuevos métodos de extracción incluyen las hidrólisis ácida y alcalina, rotura celular bajo presión, fermentación y extracción asistida por enzimas (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021). Recientes tecnologías en equipos de extracción de biomoléculas reducen los tiempos gracias a alternancias entre presión, temperaturas y solventes. Se han desarrollado métodos verdes de extracción alternativos como con líquido presurizado, con agua subcrítica, con fluido supercrítico, la asistida por microondas y la extracción asistida por ultrasonido con diferentes solventes (acetona, etanol, metanol, 2-propanol y agua), incluyendo solventes alternos como líquidos iónicos (Rudke *et al.*, 2020). A medida que la investigación en este campo continúe, es probable que los extractos de algas se vuelvan aún más comunes en la agricultura y se actualicen los métodos tradicionales de extracción por tecnologías innovadoras.

### Propuestas para Ecuador

Los extractos de algas son una alternativa natural y sostenible a los agroquímicos sintéticos. Son seguros y pueden ayudar a los agricultores a mejorar la productividad de sus cultivos a costos más accesibles (Sithampanathan *et al.*, 2019). El uso de las algas marinas como bioestimulantes es un sector en crecimiento en varias partes del mundo, incluyendo Latinoamérica (González-Giro *et al.*, 2018). La mejora en el crecimiento y la productividad de varios cultivos en diferentes países después de la aplicación del extracto de algas marinas *K. alvarezii* y *A. spicifera* ha ido documentándose alentadoramente y su aplicabilidad en más cultivos de importancia económica sigue investigándose. Todavía existe escasez de datos y estudios que documenten de manera adecuada el potencial de aplicación de *H. spinella*.

Ecuador posee experiencia en el cultivo de macroalgas nativas y exóticas como *A. spicifera* y *K. alvarezii* (Jiménez y Torres, 2023). Esta práctica ofrece una alternativa prometedora para mejorar la inmunidad y resistencia al estrés de los cultivos de interés comercial nacional e internacional,

compounds have the potential to promote crop growth and develop defense mechanisms, and they counteract oxidative stress (Roy *et al.*, 2022). Consequently, they are candidates to replace a variety of synthetic molecules to address issues of compaction, water retention, or salinity.

### Extraction methods

There are various methods for extracting the active principles of algae, which are based on achieving cell rupture to release the components of interest. New extraction methods include acid and alkaline hydrolysis, cell disruption under pressure, fermentation, and enzyme-assisted extraction (Flórez-Jalixto *et al.*, 2021). Recent technologies in biomolecule extraction equipment reduce times thanks to alternations between pressure, temperatures, and solvents. Green alternative extraction methods have been developed, such as those with pressurized liquid, subcritical water, and supercritical fluid, as well as microwave- and ultrasound-assisted extraction using different solvents (acetone, ethanol, methanol, 2-propanol, and water), including alternative solvents such as ionic liquids (Rudke *et al.*, 2020). As research in this field continues, it is likely that algae extracts will become even more common in agriculture, and that traditional extraction methods will be updated by innovative technologies.

### Proposals for Ecuador

Algal extracts are a natural and sustainable alternative to synthetic agrochemicals. They are safe and can help farmers to improve the productivity of their crops at more accessible costs (Sithampanathan *et al.*, 2019). The use of seaweed as biostimulants is a growing sector in various parts of the world, including Latin America (González-Giro *et al.*, 2018). Improvements in the growth and productivity of various crops in different countries, following the application of seaweed extracts from *K. alvarezii* and *A. spicifera*, have been encouragingly documented, and their applicability in more economically important crops continues to be researched. There is still a scarcity of data and studies that adequately document the application potential of *H. spinella*.

Ecuador has experience in cultivating native and exotic macroalgae such as *A. spicifera* and *K. alvarezii* (Jiménez and Torres, 2023). This practice offers a promising alternative to improve the immunity and stress resistance of crops of national and international commercial interest, in addition to reducing the use of synthetic chemical inputs. Developing this market in Ecuador would pave the way to

además de reducir el uso de insumos químicos sintéticos. El desarrollo de este mercado en Ecuador abriría las puertas a la creación de nuevas industrias que aprovechen los compuestos bioactivos de las macroalgas. Sin embargo, para avanzar en este campo, se requiere investigación más profunda que abarque procedimientos de extracción, análisis químicos totales, la influencia de su origen sobre sus componentes, el efecto de la estacionalidad, entre otros factores. La riqueza en minerales, vitaminas, sustancias bioactivas, proteínas y lípidos con propiedades antibacteriales, antivirales y antifúngicos proveen un optimista futuro de su uso como materia prima para la extracción de componentes bioactivos para bioformulaciones agrícolas.

En la actualidad, la implementación exitosa del cultivo comercial de *K. alvarezii* en Ecuador ha demostrado que las innovaciones científicas pueden beneficiar a las poblaciones rurales costeras que carecen de oportunidades económicas alternativas. El aprovechamiento biotecnológico de *A. spicifera* podría contribuir a mitigar su invasividad en las costas ecuatorianas. Por último, el análisis químico de *H. spinella* permitiría explorar su potencial de aprovechamiento sinérgico en combinación con las algas previamente mencionadas.

Por otro lado, el avance continuo tanto en los métodos agrícolas como en el desarrollo de productos integrados es crucial para atraer inversiones. La economía rural no solo se verá impulsada mediante el cultivo comercial de algas, sino también mediante el empleo de bioformulaciones líquidas y sólidas a partir de la biomasa de algas (Mantri *et al.*, 2017). Además, su aprovechamiento sería el comienzo del desarrollo de industrias paralelas que exploten sus demás subproductos.

Dada la información existente, Ecuador debe aprovechar la implementación de esta alternativa agroecológica en su proceso de transición a una agricultura verde, ya que los extractos de algas marinas contienen casi todos los nutrientes principales y secundarios de las plantas. Para ello serán necesarios esfuerzos gubernamentales para una planificación holística en la implementación de proyectos de cultivo de algas marinas que permitan llevar a cabo una actividad comercial con un alto grado de confianza y eficiencia, lo cual repercutirá en una mejoría de la economía local costera. La expansión geográfica de la agricultura comercial es inevitable en el futuro previsible, pero se espera que el gobierno de turno aumente la financiación de I + D e incentive la inversión externa o privada para la agricultura en aguas profundas y en alta mar junto a una continua evaluación ambiental y social.

the creation of new industries that leverage the bioactive compounds of macroalgae. However, to advance in this field, more in-depth research is required which covers extraction procedures, total chemical analysis, the influence of origin on components, and the effect of seasonality, among other factors. The richness in minerals, vitamins, bioactive substances, proteins, and lipids with antibacterial, antiviral, and antifungal properties provides an optimistic future for their use as raw materials for extracting bioactive components for agricultural bioformulations.

Currently, the successful implementation of the commercial cultivation of *K. alvarezii* in Ecuador has demonstrated that scientific innovations can benefit coastal rural populations lacking alternative economic opportunities. The biotechnological exploitation of *A. spicifera* could help mitigate its invasiveness on the Ecuadorian coasts. Finally, the chemical analysis of *H. spinella* would allow exploring its potential for synergistic utilization in combination with the aforementioned algae.

On the other hand, continuous advancement in both agricultural methods and the development of integrated products is crucial to attract investments. The rural economy will not only be bolstered by the commercial cultivation of algae, but also through the use of liquid and solid bioformulations derived from algae biomass (Mantri *et al.*, 2017). Furthermore, their utilization would mark the beginning of the development of parallel industries that exploit their other by-products.

Given the existing information, Ecuador should leverage the implementation of this agroecological alternative in its transition towards a green agriculture, as seaweed extracts contain nearly all primary and secondary nutrients for plants. This merits government efforts for holistic planning in the implementation of seaweed cultivation projects that enable commercial activity with a high degree of confidence and efficiency, which will lead to an improvement in the local coastal economy. The geographical expansion of commercial agriculture is inevitable in the foreseeable future, but the current government is expected to increase R + D funding and encourage external or private investment for agriculture in deep and offshore waters, along with continuous environmental and social assessment.



## CONCLUSIONES

Las macroalgas rojas, particularmente *K. alvarezii*, *A. spicifera* e *H. spinella*, presentan un destacado potencial biotecnológico para su aplicación en la agricultura sostenible del Ecuador. Estos organismos marinos, ampliamente distribuidos en la región costera del país, albergan una diversidad de compuestos bioactivos como polisacáridos, aminoácidos, enzimas, polifenoles, pigmentos vegetales y hormonas, dotándolos de propiedades elicitoras y fitoestimuladoras. La inclusión de extractos de estas macroalgas en la producción agrícola ha evidenciado impactos positivos al mejorar la resistencia de las plantas a enfermedades, activar mecanismos de defensa, modular la microbiota del suelo y potenciar el rendimiento y la calidad de los cultivos. Además, el cultivo de macroalgas es una práctica sostenible que no requiere agua dulce ni compite por la tierra, y puede mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por aumento de biomasa (asimilación de carbono durante el crecimiento). Ecuador cuenta con condiciones climáticas y oceanográficas favorables para el desarrollo del cultivo de macroalgas, especialmente en la provincia de Santa Elena, lo que representa una oportunidad significativa para diversificar la acuicultura y promover la agricultura sostenible en el país.

Por ello, se recomienda promover la investigación y el desarrollo de tecnologías destinadas al cultivo y procesamiento de macroalgas rojas en Ecuador, con un enfoque en las especies *K. alvarezii*, *A. spicifera* e *H. spinella*. Estos esfuerzos investigativos deben abarcar la optimización de las condiciones de cultivo, la exhaustiva caracterización de los compuestos bioactivos presentes en estas macroalgas, y la evaluación rigurosa de su efectividad en diversos cultivos agrícolas. Asimismo, se insta a fomentar la colaboración interdisciplinaria entre instituciones académicas, centros de investigación y entidades del sector agrícola para facilitar la transferencia de conocimientos y tecnologías especializadas en este campo emergente. Es importante también desarrollar políticas y regulaciones que fomenten el uso de bioestimulantes a base de macroalgas como una alternativa sostenible a los agroquímicos sintéticos, en línea con las tendencias internacionales hacia una agricultura más ecológica. Por último, se aconseja educar a los agricultores acerca de los múltiples beneficios que ofrecen los bioestimulantes de macroalgas y promover activamente su integración en las prácticas agrícolas cotidianas; esto contribuirá significativamente a la sostenibilidad y competitividad del sector agrícola ecuatoriano en el contexto global.

## CONCLUSIONS

Red macroalgae, particularly *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella*, exhibit significant biotechnological potential for application in sustainable agriculture in Ecuador. These marine organisms, widely distributed along the country's coastal region, contain a diversity of bioactive compounds such as polysaccharides, amino acids, enzymes, polyphenols, plant pigments, and hormones, which provides them with elicitor and phyto-stimulator properties. The inclusion of extracts from these macroalgae in agricultural production has evidenced positive impacts, enhancing plant disease resistance, activating defense mechanisms, modulating soil microbiota, and bolstering crop yield and quality. Moreover, the cultivation of macroalgae is a sustainable practice that does not require fresh water or competition for land, and it can mitigate carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions through increased biomass (carbon assimilation during growth). Ecuador has favorable climatic and oceanographic conditions for the development of macroalgae cultivation, especially in the province of Santa Elena, which represents a significant opportunity to diversify aquaculture and promote sustainable agriculture in the country.

Therefore, promoting research and development on technologies aimed at the cultivation and processing of red macroalgae in Ecuador is recommended, with a focus on the species *K. alvarezii*, *A. spicifera*, and *H. spinella*. These research efforts should cover the optimization of cultivation conditions, the thorough characterization of the bioactive compounds present in these macroalgae, and the rigorous evaluation of their effectiveness in various agricultural crops. Furthermore, academic institutions, research centers, and entities in the agricultural sector are called upon to collaborate in an interdisciplinary manner to facilitate the transfer of knowledge and technologies specialized in this emerging field. It is also important to develop policies and regulations that encourage the use of macroalgae-based biostimulants as a sustainable alternative to synthetic agrochemicals, in line with international trends towards a more ecological agriculture. Finally, it is advisable to educate farmers about the multiple benefits offered by macroalgae biostimulants and actively promote their integration into everyday agricultural practices. This will significantly contribute to the sustainability and competitiveness of the Ecuadorian agricultural sector on the global stage.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a cada una de las instituciones representadas por los autores, sin cuyo apoyo, compromiso y motivación por la divulgación científica este trabajo no hubiese sido posible.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank each of the institutions represented by the authors; without their support, commitment, and motivation for scientific dissemination, this work would not have been possible.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Agarwal, P., M. Dangariya and P. Agarwal. 2021. Seaweed extracts: Potential biodegradable, environmentally friendly resources for regulating plant defense. *Algal Res.*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102363>
- Alcántara, J.D. and N. Lázaro-Llanos. 2020. Mineral availability, dietary fiber contents, and short-chain fatty acid fermentation products of *Caulerpa lentillifera* and *Kappaphycus alvarezii* seaweeds. *Komun. Kimika*, 31(1), 1–10. <https://doi.org/10.26534/kimika.v31i1.1-10>
- Ali, O., A. Ramsubhag and J. Jayaraman. 2021. Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3): 1–27. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Ali, O., A. Ramsubhag and J. Jayaraman. 2022. Transcriptome-wide modulation by *Sargassum vulgare* and *Acanthophora spicifera* extracts results in a prime-triggered plant signalling cascade in tomato and sweet pepper. *AoB Plants*, 14(6): 1–18. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plac046>
- Al-Shatri, A.H., N.M. Pakyürek and A. Yaviç. 2020. Effect of seaweed application on nutrient uptake of strawberry cv. Albion grown under the environmental conditions of northern Iraq. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 18(1), 1267–1279. [https://doi.org/10.15666/aeer/1801\\_12671279](https://doi.org/10.15666/aeer/1801_12671279)
- Aminah, A. and G. K. Xiren. 2017. Proximate composition and total amino acid composition of *Kappaphycus alvarezii* found in the waters of Langkawi and Sabah, Malaysia. *Int. Food Res. J.*, 24(3): 1255–1260.
- Ammar, G., M. Ashour and S. M. Hassan. 2022. Enhancing potato production by applying commercial seaweed extract (TAM®) biostimulant under field conditions. *JAAR*, 27(3), 492-504. <https://doi.org/10.21608/jalexu.2022.155031.1077>
- Ashour, M., S. M. Hassan, M. E. Elshobary, G. A. G. Ammar, A. Gaber, W. F. Alsanie, A. T. Mansour and R. El-shenody. 2021. Impact of commercial seaweed liquid extract (Tam®) biostimulant and its bioactive molecules on growth and antioxidant activities of hot pepper (*Capsicum annuum*). *Plants*, 10(6), 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants10061045>
- Augusto, A., T. Simões, R. Pedrosa and S. F. J. Silva. 2016. Evaluation of seaweed extracts functionality as post-harvest treatment for minimally processed Fuji apples. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 33, 589-595. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.004>
- Banakar, S., N., M. K. Prasanna Kumar, H. B. Mahesh, P. B. Parivallal, M. E. Puneeth, C. Gautam, D. Pramesh, T. N. Shiva Kumara, T. R. Girish, S. Nori and S. S. Narayan. 2022. Red-seaweed biostimulants differentially alleviate the impact of fungicidal stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Scient. Rep.*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10010-8>
- Baskararaj, S., T. Panneerselvam, S. Govindaraj, S. Arunachalam, P. Parasuraman, S. R. K. Pandian, M. Sankaranarayanan, U. P. Mohan, P. Palanisamy, V. Ravishankar and S. Kunjiappan. 2020. Formulation and characterization of folate receptor-targeted PEGylated liposome encapsulating bioactive compounds from *Kappaphycus alvarezii* for cancer therapy. *3 Biotech*, 10(3): 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2132-7>
- Brotosudarmo, T., H. Heriyanto, Y. Shioi, I. Indriatmoko, M. Setya, R. Indrawati and L. Limantara. 2018. Composition of the main dominant pigments from potential two edible seaweeds. *Philipp J. Sci.*, 147(1): 47–55.
- Cai, J. 2021. Global status of seaweed production, trade and utilization. Seaweed Innovation Forum Belize (28 May 2021). Available at: <https://www.competecaribbean.org/wp-content/uploads/2021/05/Global-status-of-seaweed-production-trade-and-utilization-Junning-Cai-FAO.pdf>
- Cai, J., A. Lovatelli, J. Aguilar-Manjarrez, L. Cornish, L. Dabbadie, A. Desrochers, S. Diffey, E. Garrido Gamarro, J. Geehan, A. Hurtado, D. Lucente, G. Mair, W. Miao, P. Potin, C. Przybyla, M. Reantaso, R. Roubach, M. Tauati and X. Yuan. 2021. Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fish. Aquacult. Circ.*, 1229. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>
- Cokrowati, N., Y. Risjani, S. Andayani and M. Firdaus. 2023. Phytohormone quantification of *Kappaphycus alvarezii* at different cultivated ages. *J. Penyuluh. Perikan. Kelaut.*, 28(1): 89–96.
- Dash, A., D. Samant, D. K. Dash, S. N. Dash and K. N. Mishra. 2021. Influence of *Ascophyllum nodosum* extract, homobrassinolide and triacontanol on fruit retention, yield and quality of mango. *J. Environ. Biol.*, 42(4), 1085–1091. <https://doi.org/10.22438/jeb/42/4/MRN-1541>



- Dziugieł, T. and W. Wadas. 2020. Effect of plant biostimulants on macronutrient content in early crop potato tubers. *Agronomy*, 10(8), 1202. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081202>
- Elsharkawy, G., A., H. A. H. Ibrahim, A. H. Salah, M. Akrami, H. M. Ali and D. Y. Abd-Elkader. 2021. Early and total yield enhancement of the globe artichoke using an ecofriendly seaweed extract-based biostimulant and pk fertilizer. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091819>
- Ertani, A., O. Francioso, A. Tinti, M. Schiavon, D. Pizzeghello and S. Nardi. 2018. Evaluation of seaweed extracts from *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum* spp. As biostimulants in *Zea mays* L. using a combination of chemical, biochemical and morphological approaches. *Front. Plant Sci.*, 9(April). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00428>
- Espinosa-Antón, A., A., J. F. Zamora-Natera, P. Zarazúa-Villaseñor, F. Santacruz-Ruvalcaba, C. V. Sánchez-Hernández, E. Águila Alcántara, M. I. Torres-Morán, A. P. Velasco-Ramírez and R. M. Hernández-Herrera. 2023. Application of seaweed generates changes in the substrate and stimulates the growth of tomato plants. *Plants*, 12(7), 1520. <https://doi.org/10.3390/plants12071520>
- FAO. 2022. Thinking about the future of food safety—A foresight report. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb8667en>
- Fatimah, S., H. Alimon and N. Daud. 2018. The effect of seaweed extract (*Sargassum* sp) used as fertilizer on plant growth of *Capsicum annum* (chilli) and *Lycopersicon esculentum* (tomato). *Indones. J. Sci. Technol.*, 3(2), 115–123. <https://doi.org/10.17509/ijost.v3i2.12755>
- Flórez-Jalixto, M., D. Roldán-Acero, J. R. Omote-Sibina and A. Molleda-Ordóñez. 2021. Biofertilizers and biostimulants for agricultural and aquaculture use: Bioprocesses applied to organic by-products of the fishing industry. *Sci. Agropec.*, 12(4): 635-651. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.067>
- Ganesan, M., R. Kannan, K. Rajendran, C. Govindasamy, P. Sampathkumar and L. Kannan. 1991. Trace metals distribution in seaweeds of the Gulf of Mannar, Bay of Bengal. *Mar. Pollut. Bull.*, 22(4): 205–207. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(91\)90472-5](https://doi.org/10.1016/0025-326X(91)90472-5)
- Gara, A. B., N. Hammami, R. Chaaben, A. El Feki, F. P. Pattie, K. Belghith and I. Dahech. 2022. Inhibition of key digestive enzymes related to diabetes and protection of  $\beta$ -cell and liver- kidney functions by *Hypnea spinella* sulfated polysaccharide in diabetic rats. *Res Sq.*
- González-Giro, Z., P. L. Batista-Corbal, Y. González-Pérez, E. Rodríguez-Leblanch y E. Marcos-Albear. 2018. Evaluación de la fitotoxicidad de un extracto acuoso del alga *Padina gymnospora* (Kützinger) sobre semillas de *Lactuca sativa* L. *Biot. Veg.*, 18(3): 181–188.
- Guillén, P. O., P. Motti, S. Mangelinckx, O. De Clerck, P. Bossier and S. Van Den Hende. 2022. Valorization of the chemical diversity of the tropical red seaweeds *Acanthophora* and *Kappaphycus* and their applications in aquaculture: A review. *Front. Mar. Sci.*, 9: 1–21. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.957290>
- Hamzah, L., M., H. K. Hussein and F. K. M. Al-Waili. 2023. Response of sour orange seedlings to spraying with magnesium and seaweed extract Kelpak 40b. April. <https://connectjournals.com/pages/articledetails/toc036548>
- Hassan, S., M., M. Ashour, N. Sakai, L. Zhang, H. A. Hassanien, A. Gaber and G. A. G. Ammarr. 2021. Impact of seaweed liquid extract biostimulant on growth, yield, and chemical composition of cucumber (*Cucumis sativus*). *Agriculture*, 11(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040320>
- Illera-Vives, M., S. Seoane-Labandeira, M. Fernández-Labrada and M. E. López-Mosquera. 2020. Agricultural uses of seaweed. 591–612. En: Torres, M. D., S. Kraan and H. Dominguez (Eds). *Sustainable seaweed technologies: cultivation, biorefinery, and applications*. Elsevier, Lugo. 732 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817943-7.00020-2>
- Jiménez, J. y G. Torres. 2023. Diagnóstico de la maricultura en Ecuador: oportunidades y desafíos. *AquaTechnica*, 5(2), 134–155. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8411400>
- Karhikeyan, K. and M. Shanmugam. 2017. The effect of potassium-rich biostimulant from seaweed *Kappaphycus alvarezii* on yield and quality of cane and cane juice of sugarcane var. Co 86032 under plantation and ratoon crops. *J. Appl. Psychol.*, 29(6), 3245–3252. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1211-6>
- Khan, W., U.P. Rayirath, S. Subramanian, M. N. Jithesh, P. Rayorath, D. M. Hodges, A. T. Critchley, J. S. Craigie, J. Norrie and B. Prithiviraj. 2009. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *J. Plant Growth Regul.*, 28(4): 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Klejduš, B., L. Lojtková, M. Plaza, M. Šnobllová and D. Štěrbová. 2010. Hyphenated technique for the extraction and determination of isoflavones in algae: Ultrasound-assisted supercritical fluid extraction followed by fast chromatography with tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. A.*, 1217(51): 7956–7965. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.020>
- Lawanyawut, K., S. Warotaipan and A. Kaewkong. 2002. Nutritional composition and Ca, P and Fe quantities of seaweed in Thailand. *Fish. Sci.*, 68:1321–1322. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/fishsci1994/68/sup2/68\\_sup2\\_1321/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/fishsci1994/68/sup2/68_sup2_1321/_pdf)
- Layek, J., A. Das, R. G. Idapuganti, D. Sarkar, A. Ghosh, S. T. Zodape, R. Lal, G. S. Yadav, A. S. Panwar, S. Ngachan and R. S. Meena. 2018. Seaweed extract as organic bio-stimulant improves productivity and quality of rice in eastern Himalayas. *J. Appl. Phycol.*, 30(1): 547–558. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1225-0>

- Leandro, A., D. Pacheco, J. Cotas, J. C. Marques, L. Pereira and A. M. M. Gonçalves. 2020. Seaweed's bioactive candidate compounds to food industry and global food security. *Life*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/life10080140>
- Lema Ch., E., I. Chóez-Guaranda, O. Ruíz-Barzola, L. I. Jaramillo, A. Pacheco Flores de Valgaz, S. Van Den Hende y P. Manzano Santana. 2023. Estudio de la variabilidad en el tiempo y espacio de la actividad antioxidante y composición bioquímica de *Kappaphycus alvarezii* en diferentes densidades de siembra. *Rev. Bionatura*, 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.21931/rb/2023.08.01.13>
- Mantri, V. A., K. Eswaran, M. Shanmugam, M. Ganesan, V. Veeragurunathan, S. Thirupathi, C. R. K. Reddy and A. Seth. 2017. An appraisal on commercial farming of *Kappaphycus alvarezii* in India: success in diversification of livelihood and prospects. *J. Appl. Phycol.*, 29(1): 335–357. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0948-7>
- Matos, G. S., S. G. Pereira, Z. A. Genisheva, A. M. Gomes, J. A. Teixeira and C. M. R. Rocha. 2021. Advances in extraction methods to recover added-value compounds from seaweeds: Sustainability and functionality. *Foods*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030516>
- Michalak, I., K. Chojnacka, A. Dmytryk, R. Wilk, M. Gramza and E. Rój. 2016. Evaluation of supercritical extracts of algae as biostimulants of plant growth in field trials. *Front. Plant Sci.*, 7: 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01591>
- Mondal, D., A. Ghosh, K. Prasad, S. Singh, N. Bhatt, S. T. Zodape, J. P. Chaudhary, J. Chaudhari, P. B. Chatterjee, A. Seth and P. K. Ghosh. 2015. Elimination of gibberellin from *Kappaphycus alvarezii* seaweed sap foliar spray enhances corn stover production without compromising the grain yield advantage. *Plant Growth Regul.*, 75(3): 657–666. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9967-z>
- Montúfar-Romero, M., R. E. Rincones-León, L. B. Cáceres-Farías, M. M. Espinoza-Vera, U. Avendaño, T. Cruz-Jaime, L. Cubillos, W. Ruiz, W. Revelo, C. Lodeiros, A. Alfaro-Núñez and L. Cáceres-Farías. 2023. Feasibility of aquaculture cultivation of elkhorn sea moss (*Kappaphycus alvarezii*) in a horizontal long line in the Tropical Eastern Pacific. *Sci. Rep.*, 13(1), 14751. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41795-x>
- Mukherjee, A. and J. S. Patel. 2020. Seaweed extract: biostimulator of plant defense and plant productivity. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 17(1), 553–558. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>
- Murillo Carvajal, R. y R. Romo González. 2021. Diseño de una planta piloto basado en la extracción de bioestimulantes de la macroalga *Kappaphycus alvarezii* con aplicación al sector agrícola. Tesis Ing. Quim., Esc. Sup. Politécn. Lit., Guayaquil. 60 p. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52070/3/T-110225 MURILLO Y ROMO.pdf>
- Murugaiyan, K. 2020. Seasonal studies on the carbohydrate content of some marine macroalgae in Gulf of Mannar coastal region, India. *Trop. Plant Res.*, 7(3): 684–688. <https://doi.org/10.22271/tpr.2020.v7.i3.086>
- Noli, Z., A., Suwirman, Aisyah and P. Aliyyanti. 2021). Effect of liquid seaweed extracts as biostimulant on vegetative growth of soybean. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 759(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/759/1/012029>
- Pandya, M. and S. Mehta. 2023. Seaweed utilizing as a biostimulants in agriculture sector: a review. *Int. J. Res. Appl.*, 11(3): 927–934. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49561>
- Patel, K., P. Agarwal and P. K. Agarwal. 2018. *Kappaphycus alvarezii* sap mitigates abiotic-induced stress in *Triticum durum* by modulating metabolic coordination and improves growth and yield. *J. Appl. Phycol.*, 30(4): 2659–2673. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1423-4>
- Pedro, S. F., K. S. Franco Jr, V. M. Ribeiro y G. P. Brigante. 2022. Efeitos do fertilizante a base de extratos de algas marinhas no crescimento inicial do cafeeiro. *Res. Soc. Dev.*, 11(17): e79111738844. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38844>
- Pérez-Madruga, Y., I. López-Padrón e Y. Reyes-Guerrero. 2020. Las algas como alternativa natural para la producción de diferentes cultivos. *Cult. Trop.*, 41(2): 9. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Pramanick, B., K. Brahmachari, B. S. Mahapatra, A. Ghosh, D. Ghosh and S. Kar. 2017. Growth, yield and quality improvement of potato tubers through the application of seaweed sap derived from the marine alga *Kappaphycus alvarezii*. *J. Appl. Phycol.*, 29(6): 3253–3260. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1189-0>
- Raju, G., S. Kohila and K. Ramachandiran. 2017. Evaluating the effect of seaweed formulations on the quality and yield of sugarcane. *Madras Agric. J.*, 104(4–6): 4–9. <https://doi.org/10.29321/MAJ.04.000423>
- Ramu Ganesan, A., K. Subramani, M. Shanmugam, P. Seedeivi, S. Park, A. H. Alfarhan, R. Rajagopal and B. Balasubramanian. 2020. A comparison of nutritional value of underexploited edible seaweeds with recommended dietary allowances. *J. King Saud Univ. Sci.*, 32(1): 1206–1211. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.11.009>
- Rana, V., S., K. Lingwal, S. Sharma, N. Rana, R. Pawar, V. Kumar and U. Sharma. 2023. Enhancement in growth, yield and nutritive characteristics of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) by the application of biostimulant: seaweed extract. *Acta Physiol. Plant.*, 45(10): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03602-y>



- Ravi, I., K. Kamaraju, S. Kumar and S. Sailaja Nori. 2018. Foliar application of seaweed bio formulation enhances growth and yield of banana cv. grand naine (AAA). *IJONS*, 8(47): 13482–13488.
- Reka, P., A. Thahira Banu and M. Seethalakshmi. 2017. Elemental composition of selected edible seaweeds using SEM- energy dispersive spectroscopic analysis. *Int. Food Res. J.*, 24(2): 600–606.
- Rodriguez Tenorio, P. A., L. Méndez-Rodríguez, E. Serviere-Zaragoza, T. Hara and T. Zenteno-Savín. 2013. Antioxidant substances and trace element content in macroalgae from a subtropical lagoon in the west coast of the Baja California Peninsula. *Vitam. Trace Elem.*, 2(1): 1–5. <https://doi.org/10.4172/2167-0390.1000108>
- Rouphael, Y. and G. Colla. 2020. Editorial: Biostimulants in agriculture. *Front. Plant Sci.*, 11(February), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Rouphael, Y., M. Giordano, M. Cardarelli, E. Cozzolino, M. Mori, M. C. Kyriacou, P. Bonini and G. Colla. 2018. Plant-and seaweed-based extracts increase yield but differentially modulate nutritional quality of greenhouse spinach through biostimulant action. *Agronomy*, 8(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070126>
- Roy, A., D. Ghosh, M. Kasera, T. R. Girish, S. Nori, R. S. Vemanna, S. Mohapatra, S. S. Narayan and S. Bhattacharjee. 2022. *Kappaphycus alvarezii*-derived formulations enhance salicylic acid-mediated anti-bacterial defenses in *Arabidopsis thaliana* and rice. *J. Appl. Phycol.*, 34(1): 679–695. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02658-y>
- Rudke, A. R., C. J. de Andrade and S. R. S. Ferreira. 2020. *Kappaphycus alvarezii* macroalgae: An unexplored and valuable biomass for green biorefinery conversion. *Trends Food Sci. Technol.*, 103: 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.018>
- Ruiz-Medina, M. A., M. Sansón and A. M. González-Rodríguez. 2022. Changes in antioxidant activity of fresh marine macroalgae from the Canary Islands during air-drying process. *Algal Res.*, 66, 102798. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102798>
- Samuels, L. J., M. E. Setati and E. H. Blancquaert. 2022. Towards a better understanding of the potential benefits of seaweed based biostimulants in *Vitis vinifera* L. cultivars. *Plants*, 11(3), 348. <https://doi.org/10.3390/plants11030348>
- Seo, U., H. Kang, K. Yoon and Y. An. 2019. Analysis of dietary fiber, mineral content and fatty acid composition in Cheonggak (*Codium fragile*). *Korean J. Food Nutr.*, 32(4): 328–334. <https://doi.org/doi.org/10.9799/ksfan.2019.32.4.328>
- Shah, M. T., S. T. Zodape, D. R. Chaudhary, K. Eswaran and J. Chikara. 2013. Seaweed sap as an alternative liquid fertilizer for yield and quality improvement of wheat. *J. Plant Nutr.*, 36(2), 192–200. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.737886>
- Shukla, P. S., T. Borza, A. T. Critchley and B. Prithiviraj. 2021. Seaweed-based compounds and products for sustainable protection against plant pathogens. *Mar. Drugs*, 19(2): 59. <https://doi.org/10.3390/md19020059>
- Shukla, P. S., N. Nivetha, S. S. Nori, D. Bose, S. Kumar, S. Khandelwal, A. Critchley and S. Suryanarayan. 2023. Understanding the mode of action of AgroGain®, a biostimulant derived from the red seaweed *Kappaphycus alvarezii* in the stimulation of cotyledon expansion and growth of *Cucumis sativa* (cucumber). *Front. Plant Sci.*, 14(April), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1136563>
- Sithamparanathan S., W. K. Balasooriya, S. J. Arasakesary and N. Gnanavelrajah. 2019. Effect of seaweed extract (*Kappaphycus alvarezii*) on the growth, yield and nutrient uptake of leafy vegetable *Amaranthus polygamous*. *Trop. Agric. Res.*, 30(3): 81. <https://doi.org/10.4038/tar.v30i3.8321>
- Suresh Kumar, K., K. Ganesan and P. V. Subba Rao. 2015. Seasonal variation in nutritional composition of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty—an edible seaweed. *J. Food Sci. Technol.*, 52(5): 2751–2760. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1372-0>
- Tabet, E., R. Al-Haf, C. Hosri, Z. Zind, L. Farah and D. Darazy. 2021. The effect of fertigation and foliar application of seaweed's biostimulant on banana yield. *Agric. Sci.*, 3(1), p1. <https://doi.org/10.30560/as.v3n1p1>
- Udayan, A., S. Kathiresan and M. Arumugam. 2018. Kinetin and gibberellic acid (GA3) act synergistically to produce high value polyunsaturated fatty acids in *Nannochloropsis oceanica* CASA CC201. *Algal Res.*, 32: 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.03.007>
- Uju, N. P. S. U. K. Dewi, J. Santoso, I. Setyaningsih, S. D. Hardintyas and Yopi. 2020. Extraction of phycoerythrin from *Kappaphycus alvarezii* seaweed using ultrasonication. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 414(1). 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/414/1/012028>
- Vaghela, P., K. Trivedi, K. G. V. Anand, H. Brahmabhatt, J. Nayak, K. Khandhediya, K. Prasad, K. Moradiya, D. Kubavat, L. J. Konwar, V. Veeragurunathan, P. G. Grace and A. Ghosh. 2023. Scientific basis for the use of minimally processed homogenates of *Kappaphycus alvarezii* (red) and *Sargassum wightii* (brown) seaweeds as crop biostimulants. *Algal Res.*, 70. 102969. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102969>
- Valverde-Balladares, P. y H. D. Armas. 2023. Potencial nutracéutico de macroalgas marina–Ecuador. *FACSalud UNEMI*, 6(11): 42–52.

Veerman, C., T. Pinto Correia and C. Bastioli. 2020. Caring for soil is caring for life: ensure 75 % of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climat. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Rep. Mission Board Soil Health Food, Publ. Off., Brussels.82 p. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/821504>

Zakaria, N. A., D. Ibrahim, S. F. Sulaiman and A. Supardy. 2011. Assessment of antioxidant activity, total phenolic content and invitro toxicity of Malaysian red seaweed, *Acanthophora spicifera*. J. Chem. Pharm. Res., 3(1): 675–684.

Zodape, S., T., A. Gupta, S. C. Bhandari, U. S. Rawat, D. R. Chaudhary, K. Eswaran and J. Chikara. 2011. Foliar application of seaweed sap as biostimulant for enhancement of yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). J. Sci. Ind. Res. , 70(3): 215–219.

**RECIBIDO / RECEIVED:** 25/11/2023

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 11/06/2024






NOTA / NOTE

## Forma atípica de estrella de mar del género *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) encontrada en el golfo de Batabanó, Cuba, Mar Caribe.

### Atypical sea star of the genus *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) found in the Gulf of Batabanó, Cuba

Alexander Lopeztegui-Castillo\*

 0000-0002-2235-4788

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Km. 1 Carretera a San Juan de La Costa, "El Comitan".  
La Paz, Baja California Sur. C.P. 23205, México. alopeztegui@yahoo.com\*

\* Autor para correspondencia / Corresponding author

#### RESUMEN

Los equinodermos son animales exclusivamente marinos con el cuerpo cubierto de estructuras rígidas en forma de espinas. Capaces de colonizar cualquier tipo de hábitat marino, estos organismos deuterostomados se caracterizan por presentar simetría pentarradial y alcanzar tallas y formas extremadamente variadas. La presencia de ejemplares de la clase Asteroidea, segunda mejor representada entre los equinodermos, es menor en el mar Caribe que en el golfo de California y el Pacífico. En Cuba, se ha descrito un número mayor de géneros, pero un menor número de especies (76) integrantes de la clase Asteroidea. El objetivo de este trabajo fue presentar un espécimen desconocido hasta la fecha y potencialmente integrante del género *Oreaster* Müller y Troschel, 1842, dentro de la clase Asteroidea. El ejemplar fue recolectado el 29 de septiembre de 2019, en la Laguna Inglés, archipiélago de Los Canarreos, plataforma suroccidental de Cuba. No se encontraron referencias bibliográficas que reporten la presencia o existencia de un ejemplar con características similares. Como representantes del género, se registraron sólo las especies *Oreaster clavatus* Müller y Troschel, 1842, descrita principalmente para la región del Atlántico este, y *Oreaster reticulatus* (Linnaeus, 1758), de distribución más amplia y única reportada hasta la fecha en Cuba.

**PALABRAS CLAVE:** Equinodermos, biodiversidad marina, bentos, patrón irregular, espinas numerosas

#### ABSTRACT

Echinoderms are exclusively marine animals with their bodies covered in rigid (calcareous) structures in the form of spines. These deuterostome organisms can colonize any type of marine habitat, and are characterized by pentaradial symmetry, as well as a wide range of sizes and shapes. The presence of Asteroidea class specimens, the second most represented among echinoderms, is lower in the Caribbean Sea compared to the Gulf of California and the Pacific. In Cuba, a greater number of genera have been described, but there are fewer species (76) within the Asteroidea class. The objective of this study was to visually present a previously unknown specimen, potentially belonging to the *Oreaster* Müller y Troschel, 1842 genus, within the Asteroidea class. The specimen was collected on September 29, 2019, in Laguna Inglés, part of the Los Canarreos archipelago on the southwestern shelf of Cuba. No bibliographic references were found that report the presence or existence of a specimen with similar characteristics. Only two species, *Oreaster clavatus* Müller and Troschel, 1842, primarily found in the eastern Atlantic region, and *Oreaster reticulatus* (Linnaeus, 1758), which has the widest distribution reported in Cuba to date, were identified as representatives of the genus.

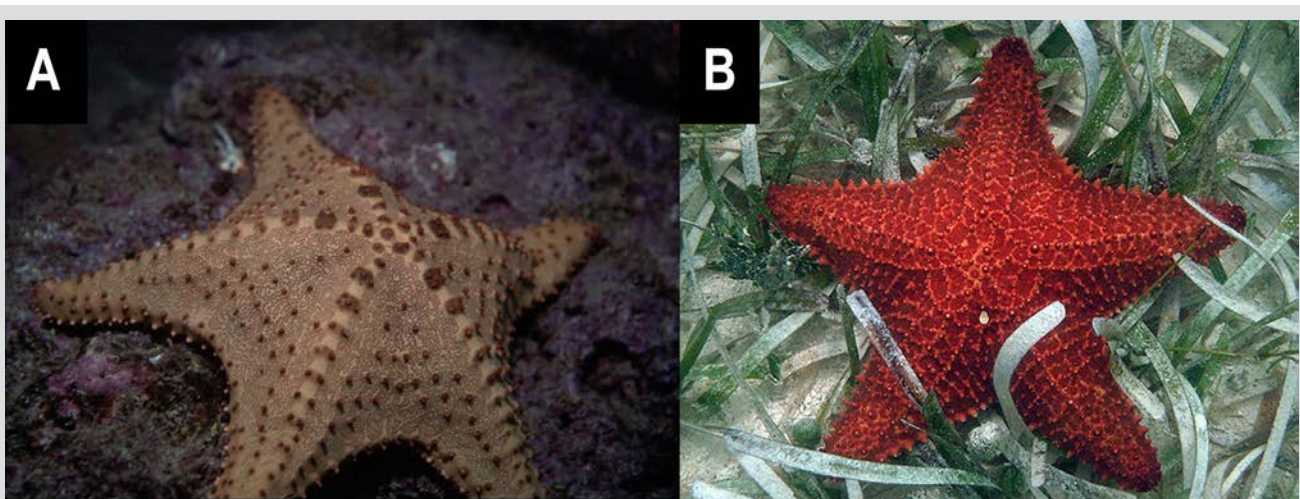
**KEYWORDS:** Echinoderms, marine biodiversity, benthos, irregular pattern, numerous spines

Los equinodermos (phylum Echinodermata) son animales exclusivamente marinos que deben su nombre a las estructuras rígidas (calcáreas) en forma de espinas que cubren su cuerpo. Capaces de colonizar cualquier tipo de hábitat marino, estos organismos deuterostomados se caracterizan además por presentar simetría pentarradial y alcanzar tallas y formas extremadamente variadas (Solís-Marín *et al.*, 2014). El esqueleto, formado por placas intradérmicas de carbonato de calcio, o de espículas calcáreas, que se articulan, permite, junto a la existencia de un tejido conectivo flexible, cambiar voluntaria y rápidamente la forma y rigidez del animal (Hendler *et al.*, 1995; Samyn *et al.*, 2006). Un sistema vascular acuífero único, que funciona como soporte vascular, además de contribuir a la locomoción y los cambios de forma, interviene en la alimentación y otras funciones básicas circulatorias. Se trata de un sistema que consiste en una red interna de canales y reservorios flexibles conectados a extensiones externas (Samyn *et al.*, 2006).

Actualmente el phylum Echinodermata se encuentra dividido en cinco clases (Solís-Marín *et al.*, 1993, 2014; 2018). En México, la clase Asteroidea es la segunda mejor representada, con 229 especies, que corresponden al 28 % de las especies descritas (Solís-Marín *et al.*, 2018). La representación de los asteroideos en el mar Caribe es menor que la reportada en el golfo de California y el Pacífico. En tales regiones del oeste de México (golfo de California y el Pacífico mexicano), los géneros más representativos son: *Astropecten*, *Luidia*, *Nidorellia*, *Oreaster*, *Pharia*, *Phataria* y *Heliaster* (Solís-Marín *et al.*, 1993, 2014). En comparación con lo registrado para México, en Cuba, se ha descrito un número mayor de

Echinoderms (phylum Echinodermata) are exclusively marine animals that owe their name to the rigid (calcareous) structures in the form of spines that cover their body, externally. Echinoderms are able for colonizing any type of marine habitat. These deuterostome organisms are also characterized by presenting pentaradial symmetry and reaching extremely varied sizes and shapes (Solís-Marín *et al.*, 2014). The skeleton is formed by intradermal plates of calcium carbonate, or calcareous spicules, which articulate each other's. Such articulations work together with the existence of a flexible connective tissue, allowing to voluntarily and quickly change the shape and rigidity of the animal, (Hendler *et al.*, 1995; Samyn *et al.*, 2006). Contributing to locomotion and shape changes, a unique aquiferous vascular system, which functions as vascular support, is involved in feeding and other basic circulatory functions. It is a system that consists of an internal network of channels and flexible reservoirs connected to external extensions (Samyn *et al.*, 2006).

Currently, the Phylum Echinodermata (literally: spiny skinned animals) is divided into five living classes: Crinoidea, Asteroidea, Ophiuroidea, Echinoidea, and Holothuroidea. In Mexico, the class Asteroidea is the second best represented, with 229 species, which correspond to 28% of the described species (Solís-Marín *et al.*, 2018). The representation of asteroids in the Caribbean Sea is less than that reported in the Gulf of California and the Pacific. The genera *Astropecten*, *Luidia*, *Nidorellia*, *Oreaster*, *Pharia*, *Phataria*, and *Heliaster*, are the most representative in western Mexico, Gulf of California and the Mexican Pacific (Solís-Marín *et al.*, 1993, 2014). Compared to what was recorded for Mexico, in Cuba, a greater number



**Figura 1.** Aspecto externo de las especies *Oreaster clavatus* (A) y *O. reticulatus* (B), tomado de la World Asteroidea Database (consultada 08-10-2023; 9:07 pm).

**Figure 1.** External characteristics of the species *Oreaster clavatus* (A) and *O. reticulatus* (B), based on the World Asteroidea Database (revised on 08-10-2023; at 9:07 pm).

géneros (13), pero un menor número de especies, siendo que sólo 76 especies se han registrado dentro de la clase Asteroidea (Abreu-Pérez, 1997; Fernández-Osoria, 2001).

En la nomenclatura actual del género *Oreaster* Müller y Troschel, 1842, se reconocen sólo dos especies, pues los antiguos representantes se han renombrado a la vez que han sido incluidos en otros géneros. La especie *Oreaster clavatus* Müller y Troschel, 1842, descrita principalmente en la región del Atlántico este y cuya morfología externa se representa en la Figura 1A, y la especie *Oreaster reticulatus* (Linnaeus, 1758), de distribución más amplia a lo largo del Caribe y única reportada hasta la fecha en Cuba (Abreu-Pérez *et al.*, 2005) (Figura 1B). El objetivo de este trabajo fue presentar, gráficamente, un espécimen desconocido hasta la fecha e integrante del género *Oreaster*, dentro de la clase Asteroidea.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El espécimen examinado se recolectó el 29 de septiembre de 2019, en la Laguna Inglés, archipiélago de Los Canarreos, extremo sur de la plataforma suroccidental de Cuba, en los  $-82^{\circ} 06' 48''$  W;  $21^{\circ} 35' 38''$  N (Figura

of genera (13) has been described, but a smaller number of species (76) have been reported within the class Asteroidea (Abreu-Pérez, 1997; Fernández-Osoria, 2001).

Over time, some ancient sea stars formerly included within *Oreaster* have been renamed while being included in other genera. Nowadays, the nomenclature of the genus *Oreaster* Müller and Troschel, 1842, includes only two species. The species *Oreaster clavatus* Müller and Troschel, 1842, described mainly in the eastern Atlantic region and whose external morphology is represented in Figure 1A, and the species *Oreaster reticulatus* (Linnaeus, 1758), with a broader distribution throughout the Caribbean and the only one reported to date in Cuba (Abreu-Pérez *et al.*, 2005) (Figure 1B). The objective of this work was to present, graphically, a specimen unknown to date and a member of the genus *Oreaster*, within the class Asteroidea.

## MATERIALS AND METHODS

The examined specimen was collected on September 29, 2019, in Inglés Lagoon, at Los Canarreos archipelago, south edge of the southwestern shelf of Cuba, at  $-82^{\circ} 06' 48''$  W;  $21^{\circ} 35' 38''$  N (Figure 2). At the site, surrounded by keys

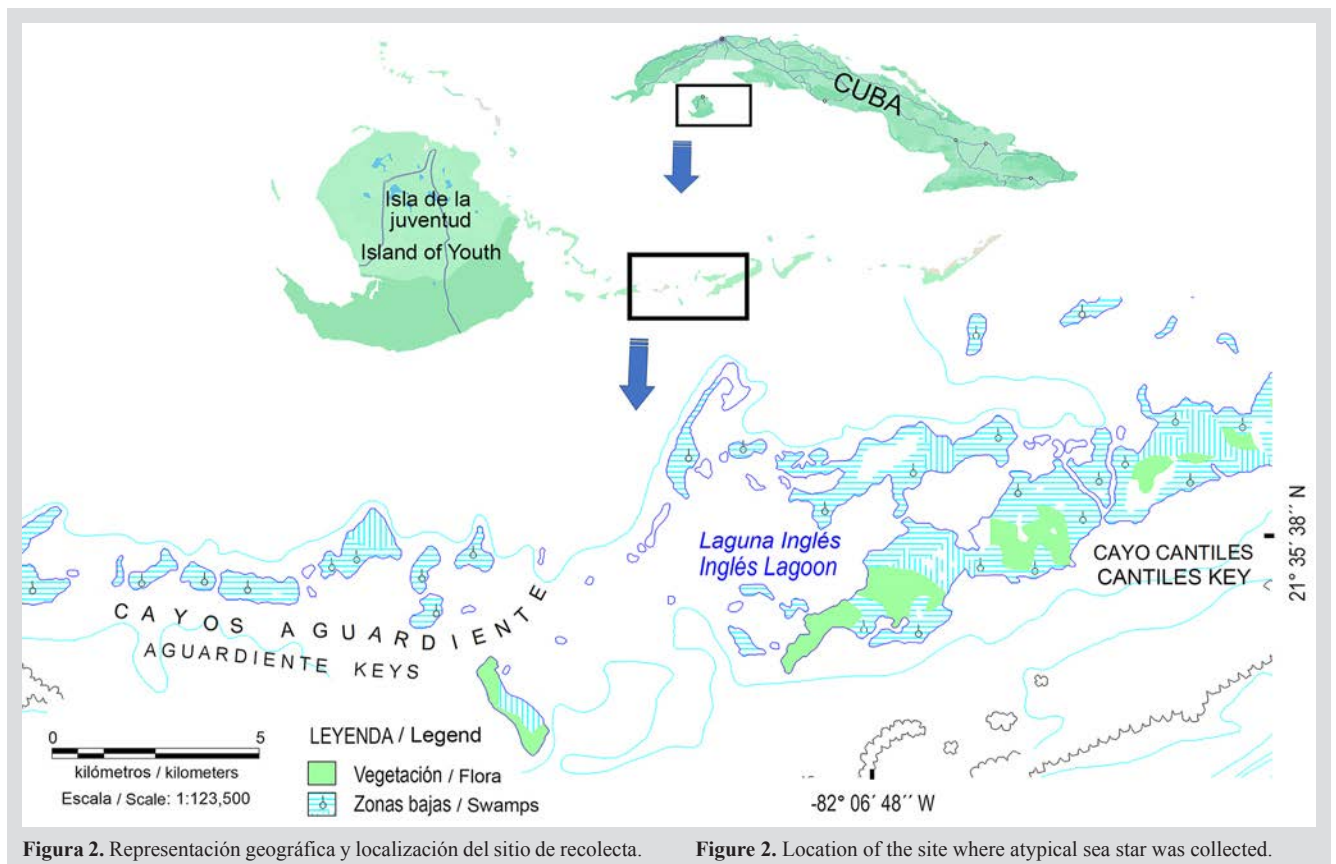


Figura 2. Representación geográfica y localización del sitio de recolecta.

Figure 2. Location of the site where atypical sea star was collected.

2). En el sitio, rodeado de cayos y cayuelos formados básicamente por mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.), la profundidad es de 3.2 m. Fondos blandos, areno-fangosos, con vegetación submarina de densidad entre media y alta, formada esencialmente por *Thalassia testudinum* K.D.Koenig, constituyeron el sustrato en el sitio de recolecta.

La recolecta se realizó durante el muestreo de esponjas comerciales, que se realiza mediante observación directa nadando en apnea (buceo libre) dentro de transeptos de  $2 \times 100$  (200 m<sup>2</sup>). El ejemplar fue recolectado manualmente luego de haber sido avistado entre las hojas de la vegetación del fondo.

### Referencias de identificación

El ejemplar, único recolectado hasta la fecha, se encuentra en la colección de organismos marinos del laboratorio de Ecología del Bentos, en el Centro de Investigaciones Pesqueras de La Habana, Cuba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El espécimen recolectado tiene una apariencia no observada previamente en aguas cubanas, y no reportada (Figura 3). Las características morfológicas externas coinciden, de forma general, con las descritas para el género *Oreaster*, con la principal excepción de que el patrón en que se disponen las espinas es irregular, a diferencia del que se presenta en *O. reticulatus* y *O. clavatus*. Básicamente, al igual que otros representantes *Oreaster*, la forma atípica que se describe en el actual texto es un ejemplar pentagonal, de brazos cortos, con disco elevado que otorga apariencia de robustez y fortaleza. Las placas abactinales son convexas, con espinas robustas y cónicas. Las placas superomarginales también tienen espinas cortas y gruesas. Las placas inferomarginales, situadas ventralmente, y las actinales, son similares, estas últimas presentan áreas interradales (en forma de “V” invertida) con uno o más tubérculos. Pedicelarios bivalvados que no se internan en alvéolos, se aprecian en ambas superficies, aunque son más numerosos en la región ventral (Gondim *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2021).

En la forma atípica que actualmente se describe, las áreas papulares tienen numerosos poros, pero no presentan apariencia triangular. No hay presencia de surcos o cordones continuos en la parte dorsal de los brazos y el disco central, por lo que la superficie dorsal no aparenta retículos, como en *O. reticulatus*. Sólo en el disco, algunos cordones incipientes, con apariencia de suturas, unen las espinas más grandes,

basically formed by red mangrove (*Rhizophora mangle* L.), the depth is 3.2 m. Soft, sandy-muddy bottoms, with underwater vegetation of medium to high density and formed essentially by *Thalassia testudinum* K.D.Koenig, constituted the substrate at the collection site.

The atypical specimen was collected during the sampling of commercial sponges, which was carried out by direct observation swimming in apnea (free diving) within the  $2 \times 100$  (200 m<sup>2</sup>) transects. The atypical sea star was manually collected, after being spotted among the bottom vegetation canopies.

### Identification references:

The unique specimen was stayed in the collection of marine organisms of the Benthos Ecology Laboratory, at the Fisheries Research Center in Havana, Cuba.

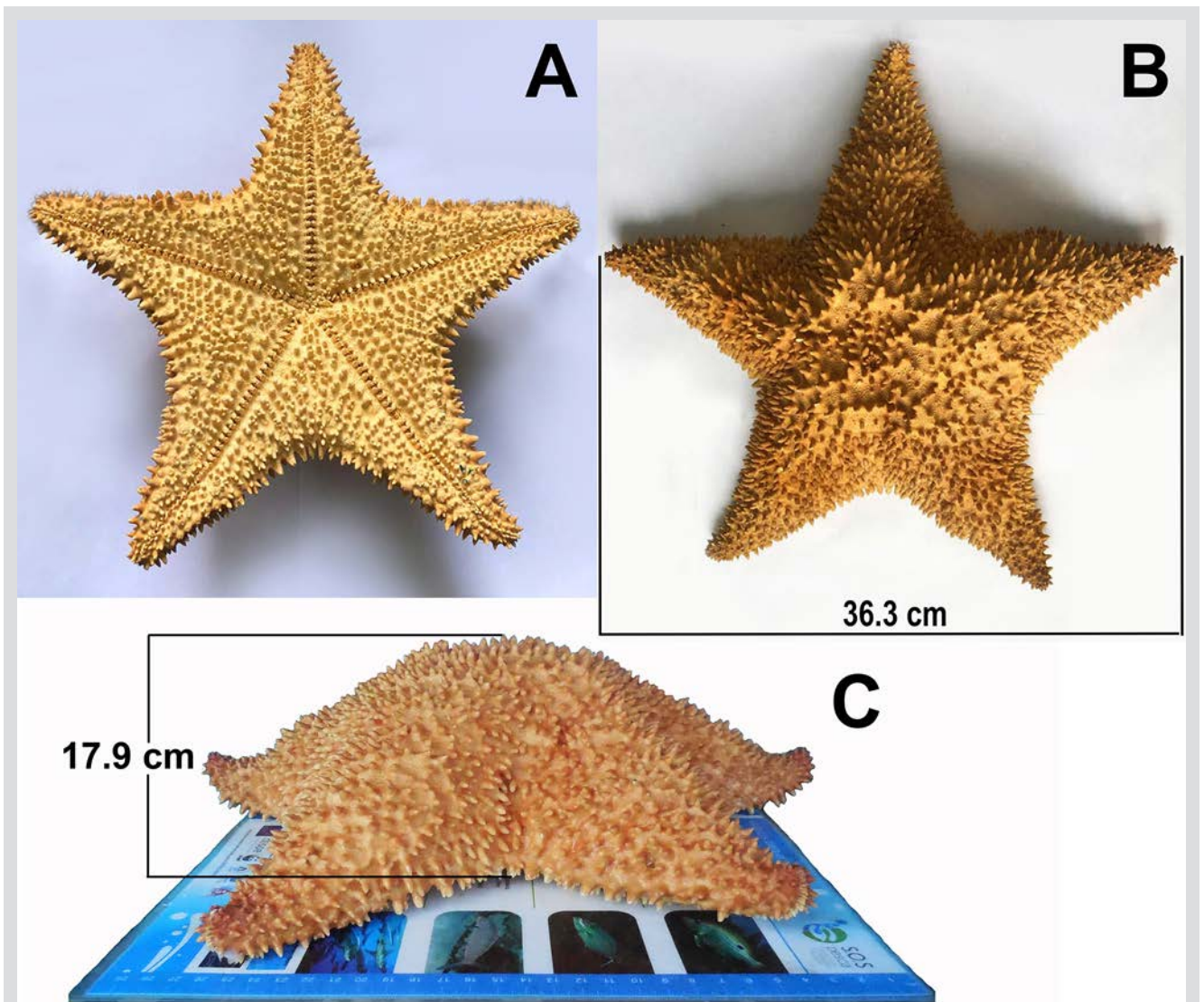
## RESULTS AND DISCUSSION

The collected specimen, called “atypical form”, looks like non previously described for Cuba and has not been reported (Figure 3). Externally, some morphological characteristics have already been described for *Oreaster*. The prime exception is that the pattern of spines arrangement is irregular, unlike that presented in *O. reticulatus* and *O. clavatus*. Basically, like other *Oreaster* species, the atypical form is a pentagonal specimen, with short arms and a raised disc that gives the appearance of robustness and strength. The abactinal plates are convex, with robust and conical spines. The supermarginal plates also have short and thick spines. The inferomarginal plates, located ventrally, and the actinal plates, are similar; the latter presenting inter-radial areas (inverted “V” shape) with one or more tubercles. Bivalved pedicellariae not included into alveoli are seen on both surfaces, although they are more numerous in the ventral region (Gondim *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2021).

In the atypical form, currently described, the papular areas have numerous pores, and do not have a triangular appearance. There is no presence of continuous grooves or cords on the dorsal part of the arms and the central disc. The dorsal surface does not appear to have the reticules described for *O. reticulatus*. Only on the disc, some incipient cords, looking like sutures, join the largest spines, which are numerous and distributed randomly over the entire surface of the organism. Both the atypical specimen and *O. reticulatus* show ambulacral plates having series of five or six short, flattened, flag-shaped spines, of which the longest spines are the central ones of each series. On the abactinal surface of *O. reticulatus*, the spine

que son numerosas y se distribuyen azarosamente en toda la superficie del organismo. Tanto en el espécimen atípico como en *O. reticulatus*, las placas ambulacrales presentan series de cinco o seis espinas cortas y aplanadas en forma de bandera, de las cuáles, las espinas más largas son las centrales, en cada serie. En la superficie abactinal de *O. reticulatus*, la densidad de las espinas es de entre 9 y 15 espinas por cada  $9 (3 \times 3) \text{ cm}^2$ ; la cual es mucho menor en *O. clavatus* (Gondim *et al.*, 2014). Sin embargo, en el ejemplar examinado, la densidad de espinas es mayor, entre 14 y 22 espinas por cada  $9 \text{ cm}^2$ ; con la particularidad de que el tamaño de las espinas es uniforme (no es frecuente la presencia de espinas de pequeño tamaño), fenómeno que se aprecia más en los brazos que en el disco central (Figura 3B).

density is between 9 and 15 spines per  $9 (3 \times 3) \text{ cm}^2$ . Such density is even lower in *O. clavatus* (Gondim *et al.*, 2014). However, in the collected specimen, the density of spines is higher, between 14 and 22 spines per  $9 \text{ cm}^2$ . The spine's size is particularly uniform (the presence of small spines is not common), in the atypical, a phenomenon that is more appreciated in the arms than in the central disc (Figure 3B).

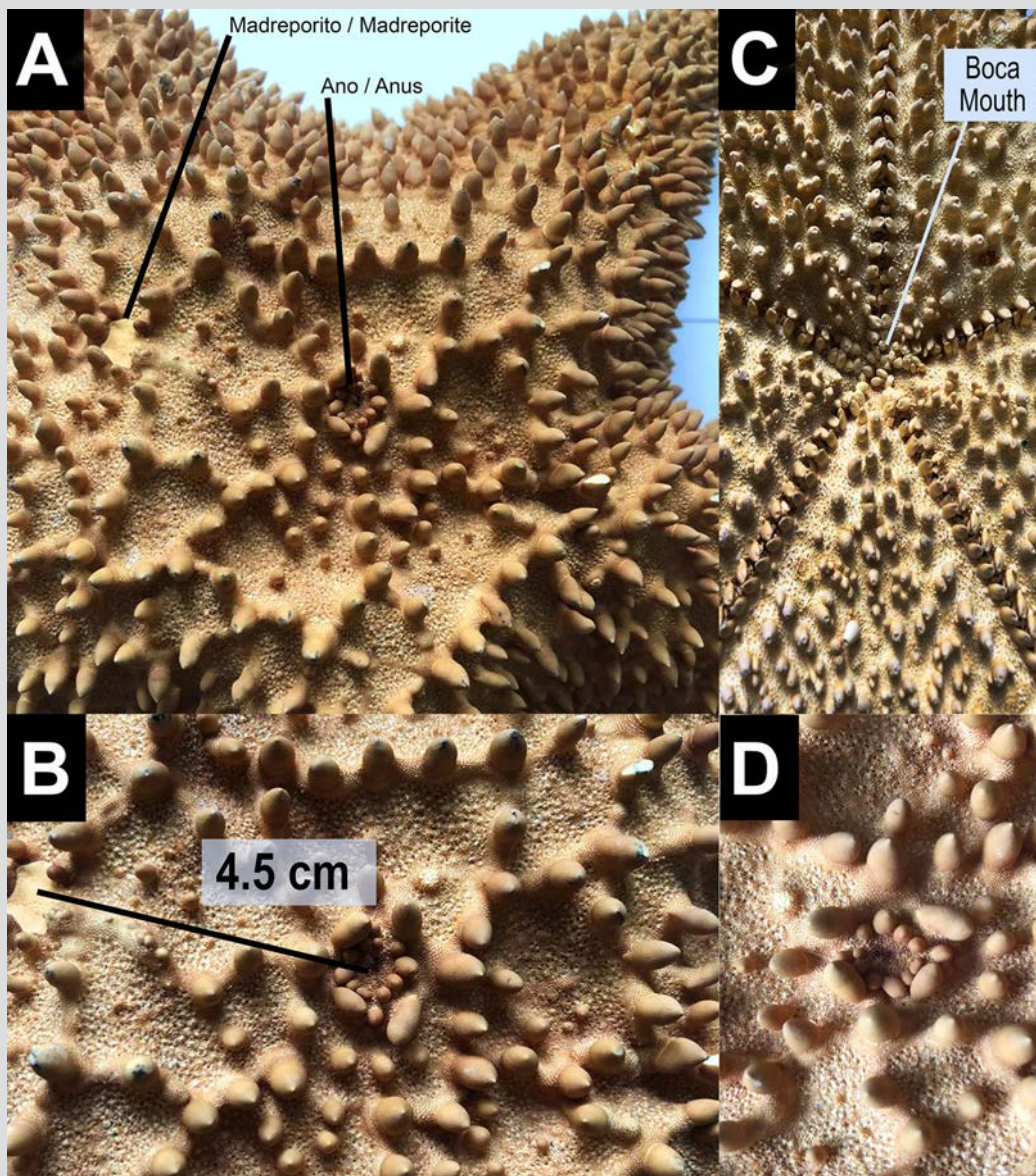


**Figura 3.** Apariencia externa de la nueva forma atípica de estrella de mar (del género *Oreaster*) recolectada en aguas del golfo de Batabanó, Cuba. A: Vista ventral; B: Vista dorsal; C: Vista lateral.

**Figure 3.** External appearance of the new atypical form of sea star (*Oreaster*) collected in shallow waters of the Gulf of Batabanó, Cuba. A: Actinal (ventral) view; B: Abactinal (dorsal) view; C: Lateral view.

En el espécimen designado como forma atípica, las placas actinales presentan de una a seis espinas cortas, cónicas y robustas, mientras que en *O. reticulatus* se presentan de una a dos espinas por placa. Al igual que en *O. reticulatus* y *O. clavatus*, en la forma atípica el madreporito es pequeño y asemeja a un ala delta, lo cual no es inusual entre los representantes del género, ya que el madreporito puede adquirir formas muy variadas (Gondim *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2020). Sin embargo, tanto el ano como el madreporito se encuentran protegidos por espinas dispuestas circularmente, a modo de fortificación (Figura 4A), lo cual no se aprecia en las

The collected specimen shows actinal plates with one to six short, conical, and robust spines. Otherwise, the actinal plates of *O. reticulatus* shows one or two spines. Like *O. reticulatus* and *O. clavatus*, the atypical form exhibits a small madreporite that looks like a delta wind. Such facts have been commonly described in *Oreaster* species (Gondim *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2020). Nevertheless, madreporite and anus are both protected by a circle of stronger spines acting like fortification (Figure 4A). Such spines are not found in *O. reticulatus* nor *O. clavatus*. Analogously to what described for *O. reticulatus*, similar size spines could be found around the



**Figura 4.** Ubicación de la boca, el ano y el madreporito, en la nueva forma atípica de estrella de mar (del género *Oreaster*) encontrado en el golfo de Batabanó, Cuba. A y B: Posición y distancia entre el madreporito y el ano, en la región dorsal; C: Boca, en la región ventral; D: Ano, en la región dorsal.

**Figure 4.** Mouth, anus, and madreporite location in an atypical form of the sea star (*Oreaster*) found in the Gulf of Batabanó, Cuba. A and B: Specific location and distances between madreporite and anus; dorsal view. C: Mouth; ventral view. D: Anus.

otras dos especies en cuestión (*O. reticulatus* y *O. clavatus*). No obstante, tanto la posición del ano y del madreporito, como la distancia entre ellos, son similares a los descritos para *O. reticulatus* (Figura 4B). En la forma atípica, el madreporito presenta una forma. Las espinas alrededor de la boca son de tamaño similar y se disponen análogamente a como lo hacen en *O. reticulatus* (Figura 4C). También la coloración de la forma atípica es similar a la presentada por algunos representantes de la mencionada especie, sin embargo, prácticamente no hay diferencias entre las regiones actinal (ventral) y abactinal (dorsal). La coloración del ejemplar examinado es uniforme, anaranjada (registrado como uno de los colores típicos en varios ejemplares de este género), y sólo en la base de las espinas tiende a ser ligeramente más intensa.

Como fue mencionado, las características observadas en el espécimen recolectado no han sido reportadas anteriormente. Sin embargo, no hay evidencias para descartar la posibilidad de que se trate de un ejemplar, adulto, de los estadios larvales recientemente descritos como una nueva especie dentro del género *Oreaster* (Janies *et al.*, 2019). Otra hipótesis es que se trate de un nuevo morfotipo dentro del mencionado género. Futuros análisis moleculares, sobre el material genético, en última instancia, permitirán corroborar las conjeturas planteadas y determinar si definitivamente se está, o no, en presencia de una nueva especie (hecho que podría implicar también otras categorías taxonómicas).

## AGRADECIMIENTOS

A los tripulantes del barco esponjero Plástico 10, perteneciente a la empresa pesquera de Batabanó, por su apoyo incondicional a los cruceros de investigación durante los cuáles se colectó el ejemplar objeto del presente estudio. A Dinorah Herrero Perezrul, Carolina Cao-Romero, Carlos Varela Pérez y José Espinosa Sáez, por sus comentarios sobre este primer manuscrito y por sus aportes corroborando la no existencia de ejemplares similares reportados previamente. A Diana Martínez-Coello por sus labores en la preservación del ejemplar y las gestiones, aún en curso, para su completa identificación taxonómica.

mouth (Figure 4C). However, the anus and mouth location, and the distance between them, are like in *O. reticulatus* (Figure 4B). Also, the color shade shown by the atypical form is like the often described for *O. reticulatus*. Nevertheless, the common difference between the colors of actinal and abactinal sides, is hardly appreciated in the atypical form. The color of the collected specimen is uniformly orange (commonly found in *Oreaster* species). Color intensity is slightly higher in the base of the spines.

As mentioned, the collected specimen shows characteristics which have not been previously reported. However, there is no evidence to rule out that it is an adult specimen of the larval stages recently described as a new species within the genus *Oreaster* (Janies *et al.*, 2019). Another hypothesis is that it is a new morphotype within that genus. Future molecular analyzes on the genetic material will ultimately allow us to corroborate such conjectures. Also, determining whether or not we are definitely in the presence of a new species (a fact that could also imply other taxonomic categories).

## ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank the crew members of the boat for sponge fishing Plástico10, belonging to the Batabanó Fishing Industry, considering their unconditional support to the research cruises during which the atypical specimen was collected. The author really appreciates comments and contributions from Dinorah Herrero Perezrul, Carolina Cao-Romero, Carlos Varela Pérez and José Espinosa Sáez, they were essential for writing the first draft of the manuscript and for corroborating the non-existence of similar specimens previously described. I render thanks to Diana Martínez-Coello for preserving the specimen and the efforts, still in progress, for its complete taxonomic identification.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Abreu-Pérez, M. 1997. Los asteroideos (Echinodermata) del Archipiélago Cubano. *Avicennia*, 6-7: 65-72.
- Abreu-Pérez, M., F.A. Solís-Marín y A. Laguarda-Figueras. 2005. Catálogo de los equinodermos (Echinodermata: Asteroidea y Ophiuroidea) nerítico-bentónicos del Archipiélago Cubano. *Rev. Biol. Trop.*, 53: 29-52. <https://doi.org/10.15517/rbt.v53i3.26665>
- Cunha, R.; M. Tavares and J.B. Mendonça. 2020. Asteroidea (Echinodermata) from shallow-waters of the remote oceanic archipelago Trindade and Martin Vaz, southeastern Atlantic, with taxonomic and zoogeographical notes. *Zootaxa*, 4742 (1): 31-56.
- Cunha, R., L. Martins, C. Menegola and C. Souto. 2021. Taxonomy of the sea stars (Echinodermata: Asteroidea) from Bahia State, including ontogenetic variation and an illustrated key to the Brazilian species. *April 2021Zootaxa* 4955(1): 1-78. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4955.1.1>
- Fernández-Osoria, A. 2001. Nuevo registro de asteroideo (Echinodermata: Asteroidea) para aguas cubanas. *Avicennia*, 14: 133-134.
- Gondim, A.I., M.L. Christoffersen and T.L. Pereira-Dias. 2014. Taxonomic guide and historical review of starfishes in northeastern Brazil (Echinodermata, Asteroidea). *ZooKeys*, 449: 1-56. <https://doi.org/10.3897/zookeys.449.6813>
- Hendler, G., J.E. Miller, D.L. Pawson and P.M. Kier. 1995. Sea stars, sea urchins & allies: Echinoderms of Florida & the Caribbean. Smithsonian Inst., Washington. 392 p.
- Janies, D., Y.Q. Hernández-Díaz, F.A. Solís-Marín, K. Lopez, B. Alexandrov, M. Galac, J. Herrera, J. Cobb, T.A. Ebert and I. Bosch. 2019. Discovery of adults linked to cloning oceanic starfish larvae (Oreaster, Asteroidea: Echinodermata). *Biol. Bull.*, 236(3): 174-185. <https://doi.org/10.1086/703233>. Epub 2019 May 20. PMID: 31167087.
- Samyn, Y., D. Vandenspiegel et C. Massin. 2006. Taxonomie des holothuries des Comores. *AbcTaxa*, 1: 1-130.
- Solís-Marín, F.A., M.D. Herrero-Pérezrul, A. Laguarda-Figueras y J. Torres-Vega. 1993. Asteroideos y equinoideos de México (Echinodermata). En S.I. Salazar-Vallejo y N.E. González (Eds.), *Biodiversidad marina y costera de México*, 91-105. Chetumal, Quintana Roo, México. 865 p.
- Solís-Marín, F.A., A. Laguarda-Figueras y M. Honey-Escandón. 2014. Biodiversidad de equinodermos (Echinodermata) en México. *Rev. Mex. Biodivers.*, Supl. 85: S441-S449.
- Solís-Marín, F.A., A. Laguarda-Figueras, M. Honey-Escandón, L. López-Luján, B. Zúñiga-Arellano, A.A. Caballero-Ochoa, C.A. Conejeros-Vargas, C. Martín-Cao-Romero, A. Durán-González y Ma.E. Diupotex-Chong. 2018. Equinodermos (Echinodermata) de México: Estado actual del conocimiento de su biodiversidad, biogeografía, estudios bioquímicos y nuevos descubrimientos arqueozoológicos. *Biol. Soc.*, 1(2): 6-21. <https://doi.org/10.29105/bys1.2-47>

**RECIBIDO / RECEIVED:** 09/10/2023

**ACEPTADO / ACCEPTED:** 17/06/2024





## Guía de autores / Author's guide

El *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* (título abreviado: Bol. Invest. Mar. Cost.) es una publicación indexada de acceso abierto, periodicidad semestral y arbitrada bajo la modalidad ciego. Está dirigida a la comunidad científica y a las personas relacionadas con temas medioambientales en zonas marino-costeras, con particular énfasis en América tropical. Considera para su publicación trabajos inéditos sobre cualquier tópico de investigación en el mar o en ambientes acuáticos de la zona costera, realizados en las áreas tropicales y subtropicales de América.

La revista es editada desde 1967 por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (Invemar). Hasta el volumen 8 llevó el nombre de *Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín* y entre los volúmenes 9 y 24 se denominó *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*. A partir del año 2008 se publican dos números por volumen anual, periodicidad que se mantiene hasta la fecha. El primer número se publica en el mes de junio y el segundo, en el mes de diciembre.

El *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* únicamente considera para publicación trabajos originales, es decir, aquellos que incluyan resultados significativos que no hayan sido publicados ni estén siendo considerados para publicación en otra revista. Se reciben artículos de investigación, notas científicas y artículos de revisión que compilen y resuman adecuadamente el trabajo en un campo particular y señalen líneas de investigación a seguir. La revista se publica en inglés y español en formato PDF que puede ser consultada en: <http://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin>. La revista se encuentra indexada en Scopus desde 2016 (Q4 del Scimago Journal Ranking en la categoría “Animal Science and Zoology”) y en Publindex (categoría C).

El *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* es una publicación de acceso abierto, por lo que no existen cargos para lectura o descarga de información, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global de conocimiento. Su distribución y divulgación es libre, siempre y cuando se respeten los respectivos créditos de los manuscritos. Los autores no deben pagar por someter o publicar sus manuscritos, a excepción de los costos de impresiones a color descritos más adelante en esta guía. Se tendrán en cuenta los manuscritos ajustados al siguiente formato:

**Idiomas:** español e inglés americano. El *Boletín* recibe artículos en sometimiento escritos en ambos idiomas o en uno solo. En este último caso, el resumen, el *abstract* y las palabras clave deben ser enviados originalmente en español e inglés americano. Por su parte, las notas científicas deben ser sometidas en ambos idiomas. A partir del año 2021, las disposiciones sobre la traducción de los artículos que culminen satisfactoriamente el proceso editorial serán informadas a través del sitio web del *Boletín*. Los autores no podrán retirar el manuscrito una vez este haya sido aceptado.

**Presentación:** para someter su artículo, debe cargarlo junto a la carta de sometimiento a través de la página. Puede hacerlo registrándose en el sitio web o ingresando con su usuario y contraseña, si ya cuenta con uno. El archivo debe ir en un solo archivo en formato Word (.doc ó .docx), con las tablas y figuras incluidas (inicialmente en baja resolución). La carta de sometimiento debe ir en formato PDF *debidamente firmada*, al menos, por el líder de correspondencia, conforme el formato disponible para descarga en el sitio web, en la sección “Guía de autores”. Si el manuscrito es aceptado para publicación, se solicitará a los autores el envío de las gráficas en formato editable (.xml [excel], .eps o .pdf vectorial) y con los textos en español e inglés americano, así como las fotos en formato JPG o TIF, con una resolución de, al menos, 360 dpi. Los colores deben corresponder a la escala CMYK.

*Bulletin of Marine and Coastal Research* (title abbreviation: Bull. Mar. Coast. Res.) is an open-access, semi-annual, indexed publication, refereed under the single-blind modality. It is aimed at the scientific community and people related to environmental issues in coastal and marine areas, with particular emphasis on tropical America. It considers unedited works about research topics on the sea or coastal aquatic environments, undertaken in the tropical and subtropical areas of the Americas.

The journal is edited since 1967 by the “José Benito Vives de Andrés” Marine and Coastal Research Institute (Invemar). Until volume 8 it was called *Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín*, and between volumes 9 and 24, it was called *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*. Since 2008, two issues are published per annual volume, a frequency that has been maintained to date. The first issue is published in June and the second in December.

*Bulletin of Marine and Coastal Research* only considers for publication original works, that is, those that include significant results that have not been published nor are being considered for publication in another journal. Research articles, scientific notes, and review articles are received that adequately compile and summarize work in a particular field and indicate lines of research to be followed. The journal is published in English and Spanish in PDF format and can be consulted at <http://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin>. The journal is indexed on Scopus since 2016 (Q4 Scimago Journal Ranking on “Animal Science and Zoology” category) and on Publindex (category C).

The *Bulletin* is an open-access journal, so there is no charge for reading or downloading information, based on the principle that providing free access to research helps to increase global knowledge exchange. Its distribution and dissemination are free, respecting each credit and authorship of the manuscripts. Authors do not pay for submitting or publishing a manuscript, except color prints as mentioned in this guide. Authors should follow the subsequent instructions:

**Languages:** Spanish and American English. The *Bulletin* receives articles in submissions written in both languages or in one language only. In the latter case, the *abstract* and keywords must be submitted originally in Spanish and American English. Scientific notes must be submitted in both languages. From 2021, the instructions on the translation of articles that successfully complete the editorial process will be reported through the *Bulletin's* website. Authors will not be able to withdraw their manuscript once it has been accepted.

**Presentation:** To submit your article, you must upload it together with the complementary files through the page. You must register on the website or enter with your user and password if you already have one. The file must be in a single file in Word format (.doc or .docx), with the tables and figures included (initially in low resolution). The letter of submission must be in PDF format, *duly signed* by, at least, the correspondence leader, according to the format available for download on the website, in the “Author's Guide” section. If the manuscript is accepted for publication, the authors will be asked to send the graphics in an editable format (.xml [excel], .eps or .pdf vectorial) and with the texts in Spanish and American English, as well as the photos in JPG or TIF format, with a resolution of at least 360 dpi. Colors must correspond to the CMYK scale.

## FORMATO:

**Fuente:** Times New Roman, tamaño 11, configuración de página tamaño carta e interlineado a doble espacio.

**Márgenes:** izquierdo y superior de 3 cm y derecho e inferior de 2 cm como mínimo.

**Títulos:** en negrilla. El *título del trabajo* debe ir en altas y bajas y centrado. Además, ha de incluir al comienzo del *abstract* una traducción fiel al inglés cuando el manuscrito sea en español y viceversa cuando sea en inglés. Los títulos de *primer nivel* deben ir en mayúscula sostenida y centrados (aplica para los nombres científicos), dejando un espacio para comenzar el párrafo. Los títulos de *segundo nivel* deben ir en minúscula y en el centro, sin dejar espacio para comenzar el párrafo. Los títulos de *tercer nivel* deben ir en minúscula y alineados a la izquierda, sin dejar espacio para comenzar el párrafo.

**Nota:** tenga en cuenta que el título debe incitar la lectura del artículo y no ser muy extenso. El ideal son 40 caracteres. Google, por ejemplo, no lee más de 50-60 caracteres. Evite el uso de guiones, signos de admiración e interrogación.

Todas las hojas deben estar **numeradas** consecutivamente.

**Texto:** los manuscritos se deben redactar en tercera persona del singular (impersonal).

Los **artículos** deben tener una extensión máxima de 6 000 palabras incluyendo figuras y tablas, pero sin contar bibliografía, resumen y *abstract*. Solo en casos excepcionales y justificados, se aceptarán manuscritos más extensos, para lo cual los autores tendrán que enviar una nueva carta de sometimiento que contenga dicha justificación. Los artículos deben tener la siguiente estructura: título, autor(es), OrcID, filiación institucional y correo electrónico de todos los autores, resumen, *abstract*, palabras clave, introducción, área de estudio, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimientos y bibliografía. Este formato puede ser modificado si la naturaleza del trabajo lo exige. Aquellas instituciones o empresas que tengan su nombre registrado en inglés pueden utilizar dicha versión.

Por su parte, las **notas científicas** deben tener una extensión máxima de 1 500 palabras, sin contar bibliografía y sin división en secciones como los artículos. Deben venir en ambos idiomas (español e inglés americano) y tener la siguiente estructura: resumen, *abstract*, palabras clave, texto, agradecimientos y bibliografía.

**Resumen:** debe tener máximo 30 renglones en un solo párrafo y el *abstract* ha de ser una traducción fiel de lo escrito en el resumen. Ambos deben llevar al final y en renglón aparte máximo cinco (5) palabras clave escritas en minúscula, tanto en la versión en español como en inglés.

**Nota:** es importante escoger bien las palabras clave. Recuerde que cualquier persona puede encontrar su trabajo en la web por intermedio de ellas. Recomendamos revisarlas a la luz del Tesoro Marino Ambiental Costero del Centro de Documentación del Invemar.

**Tablas:** elaboradas en procesador de texto con la opción Tabla, sin líneas verticales. La leyenda debe ir encima, en minúscula, y ser suficientemente explicativa. Las tablas deben ser numeradas consecutivamente y ubicadas conforme son citadas por primera vez dentro del texto. La información incluida en las tablas no puede aparecer repetida en las figuras.

**Figuras:** incluyen mapas, esquemas, dibujos, fotografías y láminas. La leyenda debe ir en el margen inferior, en minúscula, y ser suficientemente explicativa. Las figuras deben tener letras y símbolos en tamaño apropiado, de modo que al reducirlas no pierdan su nitidez. Además, deben ser numeradas consecutivamente y ubicadas conforme son citadas por primera vez dentro del texto.

## FORMAT:

**Type of font:** Times New Roman, size 11, letter-size page setup, and double spaced.

**Margins:** Left and upper, 3 cm; right and lower, 2 cm.

**Titles:** Must be written in boldface type. The *manuscript title* must be written in uppercase and lowercase and centered. It should be given in both languages too. *Main titles* must be written in capital letters, centered (even scientific names), and must be one space before the first line of the text. *Subtitles* must be also centered but as lowercase letters and there, *third titles* must be written on the left side of the paper, as lower-case letter, and also with no space.

**Note:** Special attention should be given to titles. The title should be attractive and no longer than 40 characters. Google, for example, does not take titles longer than 50-60 characters. Avoid the use of hyphens, exclamation, or interrogation marks.

All pages must be **numbered** consecutively.

**Text:** Manuscripts should be written in the third person singular (impersonal).

**Articles** must have a maximum of 6,000 words including tables and figures but excluded literature cited, *resumen*, and abstract. Only in exceptional and justified cases, more extensive manuscripts will be accepted, for which the authors will have to send a new letter of submission containing such justification. The text must be structured as follows: title, author(s), OrcID, institutional affiliation, author's email, abstract, abstract in Spanish (*resumen*), introduction, study area, materials and methods, results, discussion, conclusions, acknowledgments, and literature cited. This format can be modified depending on the type of work. Those institutions or companies that have a registered English name can use that English version.

**Scientific notes** must have a maximum of 1,500 words (excluding literature cited), without divisions and subtitles like the long manuscripts. Notes must be submitted in two languages: Spanish and American English and divided only in the abstract, abstract in Spanish (*resumen*), text, acknowledgments, and literature cited.

**Abstract:** Must be one paragraph and should not exceed 30 lines. *Resumen* should be an exact translation of the abstract, both must include at the end a maximum of five (5) keywords in lowercase letters.

**Note:** Special attention should be paid to keywords. Remember the people can find your article on the internet through them. We recommend reviewing them in light of the Coastal Environmental Marine Thesaurus of the Invemar Documentation Center.

**Tables:** Must be processed using the Table tool as text file, without vertical lines. Table legends must be placed on the top, in lowercase letters, and present clearly the content. Tables must be enumerated consecutively and placed as they are first cited in the text. The information included in tables cannot be repeated in figures.

**Figures:** They include illustrations such as maps, schemes, pictures, photographs, and plates. Figure legends must be placed on bottom, in lowercase letters, and present clearly the content. Letters and symbols on figures should have a suitable size so that if they get reduced they will not lose their shape and details. Moreover, they must be numbered and placed as they are first cited in the text.



La revista asume los costos de publicar **fotografías** en blanco y negro. Los costos de fotografías e imágenes a color deben ser asumidos por el (los) autor(es)\*. Se recomienda que en la primera versión del manuscrito se utilice una resolución de 72 dpi en escala RGB para facilitar la carga del archivo en la plataforma.

\* *El cobro de figuras a color estará sometido a cotización al momento de aceptar el manuscrito para su publicación. Es posible que no se apliquen cargos por ello. Para más información, escribir a boletin@invemar.org.co*

**Abreviaturas:** pueden usarse abreviaturas o símbolos comunes tales como m, cm, km, g, kg, mg, mL, L, % o °C, siempre y cuando acompañen números. Evitar los puntos al final de las abreviaturas. Todas las cifras decimales deben separarse con coma cuando el manuscrito está escrito en español y con punto cuando está escrito en inglés, excepto cuando se incluyan en tablas. En esos casos, los decimales deben ir con punto, independientemente del idioma.

**Citas:** No se aceptan citas de citas. Por ejemplo: Pérez, 2007 (En: Fernández, 2008). Dentro del texto, debe citarse como sigue (sin usar *op. cit.*):

“La especie vive sobre sustratos rocosos y coralinos (Pérez, 1980; Darwin y Scott, 1991), aunque, según García (1992), prefiere fondos de cascajo”.

Cuando la referencia involucra a *más de dos autores*, debe citarse como Castro *et al.* (1965) o (Castro *et al.*, 1965). *et al.* debe aparecer siempre en letra cursiva.

Las **comunicaciones personales** deben evitarse en lo posible, pero serán aceptadas a juicio del editor a cargo de cada artículo, según sea el caso. Su estructura será la siguiente:

Nombre completo (punto) Institución (punto) Ciudad (coma) País (punto) Año (punto) Com. Pers.

**Referencias:** se deben incluir todas aquellas que están citadas en el texto, en orden alfabético por apellido y en orden cronológico cuando haya varios trabajos del mismo autor. El símbolo &, comúnmente usado en la literatura en inglés, deberá reemplazarse por la letra “y” o la palabra “and”, de acuerdo con el idioma de la referencia citada. La exactitud de las referencias es responsabilidad únicamente de los autores. No se admiten citas de trabajos que no hayan sido aceptados para publicación.

**Nota:** de acuerdo con los estándares internacionales, es preferible incluir el DOI en aquellas referencias que lo tengan.

Los **artículos en prensa** deben incluir el volumen, el año y el nombre de la revista en que serán publicados.

Los artículos publicados en **revistas periódicas** se deben citar de la siguiente manera:

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) Nombre de la revista (coma) Volumen (dos puntos) Rango de páginas (punto).

Ejemplo: Blanco, J.A., J.C. Nárvaez y E.A. Viloria. 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fish. Res.*, 88: 100-108.

En los casos en que la referencia incluya la *totalidad de las páginas de la revista periódica*, se debe citar así:

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) Nombre de la revista (coma) Volumen (coma) Número total de páginas (p.).

Ejemplo: Pang, R.K. 1973. The systematics of some Jamaican excavating sponges. *Postilla*, 161, 75 p.

Cuando el nombre de la revista esté formado por más de una palabra, debe abreviarse siguiendo la información presentada en [www.ncbi.nlm.nih.gov/nlmcatalog](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nlmcatalog) (o en [www.abbreviations.com](http://www.abbreviations.com), cuando en el anterior sitio web no se encuentre la revista). Para *revistas no listadas*, debe presentarse el nombre completo.

The journal covers the costs of publishing black and white **photographs**. If there are color images in the manuscript, the authors will have to afford color page fees\*. We suggest sending images for the first version in 72 dpi resolution, in RGB scale, so that files are not too heavy to charge in the platform.

\* *The charge for color figures will be subject to the quotation at the time of acceptance of the manuscript for publication. There may be no charge for this. For more information, write to boletin@invemar.org.co*

**Abbreviations:** Abbreviations may be used and also common symbols, such as m, km, g, mg, %, or °C, as long as they are next to numbers. Do not use period marks after symbols or abbreviations. All decimal numbers have to be separated by comma (Spanish version) and points (English version), except when they are included in tables. In those cases, the decimals must be with a period, regardless of the language.

**Citation style:** There are not accepted indirect references like Pérez 2007 (In: Fernández, 2008). In the text, reference the bibliography as follows, avoiding the use of *op. cit.*:

“The species lives in rocky and coral substrates (Pérez, 1980; Darwin and Scott, 1991), although following García (1992), it prefers gravel substrate.”

When the reference includes *more than two authors*, it has to be quoted as Castro *et al.* (1965) or (Castro *et al.*, 1965), with *et al.* always written in italics.

**Personal communications** should not be used but they may be accepted by the editor depending on the specific case. If they are included, they should be presented as:

Complete name (period) Institution (period) City (comma) Country (period) Year (period) Pers. Comm.

**References:** The literature cited must include all and just the references cited in the text, in alphabetical order, and in chronological order when there is more than one article by the same author(s). The symbol &, frequently used, should be changed for the word “and” or “y” according to the original language of the cited reference. The accuracy of the references is the sole responsibility of the authors. Citations of papers that have not been accepted for publication are not allowed.

**Note:** Considering international standards, please includes DOI in all references.

If a **manuscript in press** has to be cited, it should include information about the issue, year, and title of the journal of the future publication.

**Journals** must be cited in the next format:

Author (period) Year (period) Title (period) Journal’s title (comma) Volume (two points) Page rank (period).

*i.e.:* Blanco, J.A., J.C. Nárvaez y E.A. Viloria. 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fish. Res.*, 88: 100-108.

When the reference included *all pages of the journal*, must be cited in the next format:

Author (period) Year (period) Title (period) Journal’s title (comma) Volume (comma) Total number of pages (p.).

*i.e.:* Pang, R.K. 1973. The systematics of some Jamaican excavating sponges. *Postilla*, 161, 75 p.

When the journal’s title has more than one word, it should be abbreviated following the information presented at [www.ncbi.nlm.nih.gov/nlmcatalog](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nlmcatalog) (or at [www.abbreviations.com](http://www.abbreviations.com), when the journal is not found on the previous website). For *no listed journals*, use the complete title.

Los **libros** se deben citar de la siguiente manera:

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) Editorial (coma) Ciudad (punto) Número total de páginas (p.).

Ejemplo: Dahl, G. 1971. Los peces del norte de Colombia. Inderena, Bogotá. 391 p.

Los **capítulos de libros** se deben citar de la siguiente manera:

Autor (punto) Año (punto) Título del capítulo (punto) Rango de páginas (punto). En: Editores (punto) (Ed.). Título del libro (punto) Editorial (coma) Ciudad (punto) Número total de páginas (p.).

Ejemplo: Álvarez-León, R. y J. Blanco. 1985. Composición de las comunidades ictiofaunísticas de los complejos lagunares estuarinos de la bahía de Cartagena, ciénaga de Tesca y Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. 535-555. En: Yáñez-Arancibia, A. (Ed.). Fish community ecology in estuaries and coastal lagoons. UNAM, México D.F. 653 p.

Las **memorias de reuniones y documentos inéditos** y de escasa divulgación (**tesis y literatura gris**) solo se citarán a criterio del editor del manuscrito.

Las **tesis** se deben citar como los libros.

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) Tesis y abreviatura del programa de estudios (coma) Universidad (coma) Ciudad (punto) Número total de páginas (p.).

Ejemplo: Arboleda, E. 2002. Estado actual del conocimiento y riqueza de peces, crustáceos decápodos, moluscos, equinodermos y corales escleractíneos del océano Pacífico colombiano. Tesis Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 125 p.

Los **informes** se citan de la siguiente manera:

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) Informe final (coma) Entidad (coma) Ciudad (punto) Número total de páginas (p.).

Ejemplo: Pedraza, R.A., S. Suárez y R. Julio. 1979. Evaluación de captura en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe final, Inderena, Bogotá. 39 p.

Los **documentos electrónicos** varían constantemente dentro de los sitios web. Por lo tanto, se prefiere que los autores citen documentos de este tipo únicamente en los casos en que sea indispensable hacerlo. Serán aceptados a juicio del editor a cargo de cada artículo. Si el documento tiene DOI, añádale.

Autor (punto) Año (punto) Título (punto) URL completa (sin punto) Fecha de consulta [DD/MM/AAA] (punto).

Ejemplo: Hammer, O., D.A.T. Harper y P.D. Ryan. 2008. PAST - Palaeontological Statistics, ver. 1.81. <http://folk.uio.no/ohammer/past/past.pdf>. 08/06/2008

#### Otras disposiciones:

- No se admiten notas de pie de página.
- Los nombres científicos de géneros y especies deben escribirse en cursiva. Todos ellos deben estar sujetos a los códigos de nomenclatura zoológica o botánica.
- Los registros taxonómicos deben hacerse siguiendo los códigos internacionales de nomenclatura, para lo cual el Boletín tiene un modelo con ejemplos, disponible para quien lo solicite.
- Las medidas se deben expresar en unidades del sistema métrico decimal. Los valores de salinidad deben presentarse sin unidades o símbolos.
- Al postular su manuscrito, los autores deben indicar su nombre completo, filiación institucional, dirección de correspondencia, correo electrónico y OrcID. Si alguno no lo tiene, puede obtenerlo de forma gratuita en <https://orcid.org/>

For **books**, must follow next format:

Author (period) Year (period) Title (period) Publishing house (comma) City (period) Total number of pages (p.).

*i.e.*: Dahl, G. 1971. Los peces del norte de Colombia. Inderena, Bogotá. 391 p.

For the **chapter of books**, must follow the next format:

Author (period) Year (period) Chapter name (period) Page rank (period). In: Editors' name (period) (Ed.). Title of the book (period) Publishing house (comma) City (period) Total number of pages (p.).

*i.e.*: Álvarez-León, R. y J. Blanco. 1985. Composición de las comunidades ictiofaunísticas de los complejos lagunares estuarinos de la bahía de Cartagena, ciénaga de Tesca y Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. 535-555. En: Yáñez-Arancibia, A. (Ed.). Fish community ecology in estuaries and coastal lagoons. UNAM, México D.F. 653 p.

**Memoirs of meetings** and unpublished documents of limited circulation (**theses and grey literature**) will be cited only at the discretion of the editor of the manuscript.

**Theses** should be cited like books.

Author (period) Year (period) Title (period) Title (period) Tesis and Abbreviation of study program (comma) University (comma) City (period) Total number of pages (p.).

*i.e.*: Arboleda, E. 2002. Estado actual del conocimiento y riqueza de peces, crustáceos decápodos, moluscos, equinodermos y corales escleractíneos del océano Pacífico colombiano. Tesis Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 125 p.

**Reports** are quoted as follows:

Author (period) Year (period) Title (period) Informe final (comma) Organization (comma) City (period) Total number of pages (p.).

*i.e.*: Pedraza, R.A., S. Suárez y R. Julio. 1979. Evaluación de captura en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe final, Inderena, Bogotá. 39 p.

**Web documents** vary constantly. Therefore, they should be avoided as references in the manuscripts if it is not really necessary. In special cases, it will be the editor's decision to accept it or not. Add DOI whether it is possible. If they are included, they should be presented as:

Author (period) Year (period) Title (period) Complete URL (without a period) Consultation date [DD/MM/YYYY] (period).

*i.e.*: Hammer, O., D.A.T. Harper, and P.D. Ryan. 2008. PAST - Palaeontological Statistics, ver. 1.81. <http://folk.uio.no/ohammer/past/past.pdf>. 08/06/2008.

#### Other dispositions:

- Use of footnotes in the text is strongly discouraged.
- Scientific names of genera and species must be written in italics type or underlined. All of them must be subject to the zoological or botanical nomenclature.
- Taxonomic reports should be made following the international nomenclature code, for which the journal has a model with examples, available upon request.
- Measurements have to be marked using the metric system. Salinity values have to be presented without symbols or units.
- When submitting their manuscript, authors should indicate their complete name, institutional affiliation, correspondence address, e-mail, and OrcID. If one does not have it, you can get it for free at <https://orcid.org/>



- Se deben sugerir los nombres de tres evaluadores, mínimo, para el manuscrito sometido, incluyendo la información necesaria para contactarlos (filiación institucional y correo electrónico). Es preciso aclarar que las personas sugeridas no necesariamente serán los evaluadores del manuscrito; las sugerencias están sujetas a revisión por parte del editor encargado.
- A los manuscritos publicados en el Boletín se les asignará DOI tanto en la versión electrónica como en impresa. Tener esto en cuenta para la respectiva referencia bibliográfica.
- The names of at least three evaluators should be suggested for the submitted manuscript, including the necessary contact information (institutional affiliation and e-mail). It should be clarified that the persons suggested will not necessarily be the evaluators of the manuscript; the suggestions are subject to review by the section editor.
- The manuscripts published since this number are going to have DOI, in electronic and printed version, therefore it must be referenced.

## PROCESO DE REVISIÓN

1. Los autores deben registrarse en la plataforma para obtener un usuario y contraseña y cargar el manuscrito a la plataforma. El registro se realiza una sola vez, por lo que con solo ingresar a su cuenta podrá ver el estado de su manuscrito o someter uno nuevo.
2. Junto con el artículo o nota científica, cargue la carta de sometimiento en formato PDF. Recuerde que el texto debe incluir inicialmente las figuras y tablas en baja resolución.
3. Una vez cargado el documento, este es sometido a una revisión preliminar por parte del asistente de comité editorial. Con su visto bueno, se envía invitación al comité editorial y, posteriormente, el manuscrito es asignado a un editor de sección.
4. El editor de sección define si el manuscrito pasa a evaluación por pares, si debe corregirse antes de ser evaluado o si se rechaza. Cuando el manuscrito obtiene el visto bueno del editor, pasa a evaluación por pares. Si es rechazado, los autores reciben una comunicación oficial de no aceptación del manuscrito.
5. El proceso de evaluación en el *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* es realizado por pares expertos en cada una de las temáticas que aborda la revista y se efectúa en modalidad simple ciego. Los evaluadores cuentan con 30 días calendario (contados a partir del momento en que reciben la invitación a evaluar por la plataforma) para enviar sus apreciaciones haciendo uso de la ficha de evaluación de manuscritos. Si desean hacer observaciones en el manuscrito, pueden hacerlo con el control de cambios activo y dejando comentarios al margen, siempre de forma anónima.
6. Una vez se reciben las evaluaciones, el editor determina si el manuscrito es aceptado para publicación (sin o con cambios mínimos), si requiere cambios menores o importantes, si debe pasar a una nueva ronda de evaluación o si se rechaza. Cuando el manuscrito obtiene el visto bueno del editor, los autores reciben una comunicación oficial de aceptación del manuscrito. Si es rechazado, los autores reciben una comunicación oficial de no aceptación del manuscrito. Para artículos de investigación y artículos de revisión, se emite un concepto editorial con al menos dos evaluaciones; para notas científicas, con al menos una evaluación.
7. Una vez aprobado para publicación, se inicia la edición y producción del manuscrito, que incluye las fases de corrección de estilo, traducción, maquetación y pruebas de galera.
8. Publicación en línea e impresión.
9. Difusión y divulgación en línea y distribución física.

**Nota:** en cualquier parte del proceso, los autores pueden visualizar el estado de su manuscrito ingresando con su usuario y contraseña a la plataforma. El proceso editorial puede tomar alrededor de diez (10) meses. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los tiempos dependen directamente de los actores que intervienen en el proceso, esto es, autores, editores y evaluadores.

## REVIEW PROCESS

1. Authors must register on the platform to obtain a username and password and upload the manuscript to the platform. The registration is done only once, so just by logging into your account, you can see the status of your manuscript or submit a new one.
2. Together with the article or scientific note, please upload the submission letter in PDF format. Remember that the text must initially include the figures and tables in low resolution.
3. Once the document is uploaded, it is submitted to a preliminary review by the Assistant Editorial Committee. With his approval, an invitation is sent to the editorial committee and the manuscript is then assigned to a section editor.
4. The section editor defines whether the manuscript goes to peer review, whether it must be corrected before being evaluated, or whether it is rejected. When the manuscript is approved by the editor, it goes into peer review. If it is rejected, the authors receive an official communication of non-acceptance of the manuscript.
5. The evaluation process in the *Bulletin of Marine and Coastal Research* is carried out by expert peers in each of the topics covered by the journal and is done in a single-blind modality. Evaluators have 30 calendar days (counted from the moment they receive the invitation to evaluate through the platform) to send their assessments using the manuscript evaluation form. If they wish to make comments on the manuscript, they can do so with active change control and leaving comments in the margin, always anonymously.
6. Once the evaluations are received, the editor determines whether the manuscript is accepted for publication (with or without minimal changes), whether it requires minor or major changes, whether it should go into a new round of evaluation, or whether it is rejected. When the manuscript is approved by the editor, the authors receive an official communication of acceptance of the manuscript. If it is rejected, the authors receive an official communication of non-acceptance of the manuscript. The evaluation process is single-blind. For research and review articles, an editorial concept with at least two evaluations is issued; for scientific notes, with at least one evaluation.
7. Once approved for publication, the editing, and production of the manuscript begins, which includes the phases of copyediting and proofreading, translation, layout, and galley proofs.
8. Online publishing and printing.
9. On-line diffusion and distribution of copies.

**Note:** At any part of the process, authors can view the status of their manuscript by logging in with their username and password to the platform. The editorial process can take about ten (10) months. However, it must be taken into account that the times depend directly on the actors involved in the process, that is, authors, editors, and peer reviewers.

## Ética de publicación / Publication ethics

El *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* sigue las recomendaciones de COPE (Committee on Publication Ethics) para garantizar la transparencia en el proceso de publicación para todas las partes implicadas (autores, revisores, editores).

Las contribuciones son completa responsabilidad de sus autores, no del *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, de su cuerpo editorial o del Invemar. El envío de un manuscrito se entiende como una declaración explícita por parte de los autores de que se trata de un trabajo original, que no ha sido publicado ni aceptado para su publicación ni se encuentra bajo consideración en otra revista o medio de difusión científica. Si el manuscrito incluye textos, tablas o figuras con reserva de derechos, los autores declaran en la carta de sometimiento que cuentan con la autorización para su reproducción.

La revista no cobra a los autores por publicar ni paga a los pares evaluadores. Asimismo, el trabajo de nuestro comité editorial es *ad honorem*.

**Confidencialidad:** todos los manuscritos sometidos al *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* son tratados como documentos confidenciales. El comité editorial se compromete a proteger la integridad y confidencialidad del trabajo de cada autor y el anonimato de cada evaluador. Por su parte, los evaluadores se comprometen a proteger el carácter confidencial del manuscrito asignado, teniendo en cuenta que el proceso de evaluación es simple ciego, es decir, los autores desconocen la identidad de los evaluadores, pero los evaluadores conocen la identidad de los autores.

**Copyright:** el *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* está bajo la licencia de Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (BY-NC-SA 4.0).

**Declaración de conflicto de interés:** cuando los autores someten su manuscrito al *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, deben acompañar el envío con una carta de sometimiento en la que declaran, entre otras cosas, que han leído y aprobado el manuscrito remitido en su contenido, organización, presentación y orden de autoría, por lo que no existe conflicto de interés entre ellos. En la carta, los autores también pueden solicitar que una persona no sea escogida como par evaluador cuando consideran que podrían presentarse conflicto de interés.

Los miembros del comité editorial, que fungan como editores encargados dentro de la revista, tienen la responsabilidad de declarar si presentan conflicto de interés con el manuscrito asignado. De igual manera, los pares evaluadores deben declarar si presentan conflicto de intereses al conocer el nombre de los autores del manuscrito asignado, considerando que el proceso de evaluación en la revista es simple ciego.

**Responsabilidades de los autores:** los autores están obligados a participar del proceso de evaluación respetando los tiempos estipulados de revisión y cumpliendo con los plazos de entrega. Los manuscritos que tardan más de sesenta (60) días en ser entregados por los autores cuando se les soliciten correcciones se retirarán automáticamente del *Boletín* y deberán ser sometidos nuevamente, salvo casos debidamente justificados.

El sometimiento de un manuscrito debe estar acompañado por una carta dirigida al editor general de la revista, en la que los autores firman y declaran que:

- Todos han leído y aprobado el manuscrito remitido en su contenido, organización, presentación y orden de autoría, por lo que no existe conflicto de intereses.

*Bulletin of Marine and Coastal Research* follows the recommendations of COPE (Committee on Publication Ethics) to ensure transparency in the publication process for all parties involved (authors, reviewers, editors).

Contributions are the complete responsibility of their authors, not of the *Bulletin of Marine and Coastal Research*, its editorial board, or Invemar. Submission of a manuscript is understood as an explicit statement by the authors that it has not been published or accepted for publication in another journal or scientific dissemination medium. If the manuscript includes texts, tables, or figures with reserved rights, the authors declare in the submission letter that they have the authorization to reproduce them.

The journal does not charge for publication and does not pay peer reviewers. Also, the work of our Editorial Committee is *ad honorem*.

**Confidentiality:** All manuscripts submitted to the *Bulletin of Marine and Coastal Research* are treated as confidential documents. The Editorial Committee is committed to protecting the integrity and confidentiality of each author's work and the anonymity of each reviewer. For their part, the evaluators are committed to protecting the confidentiality of the assigned manuscript, taking into account that the evaluation process is single-blind, that is, the authors do not know the identity of the evaluators, but the evaluators know the identity of the authors.

**Copyright:** *Bulletin of Coastal and Marine Research* is under Creative Commons license BY-NC-SA 4.0.

**Declaration of conflict of interest:** When authors submit their manuscript to the *Bulletin of Coastal and Marine Research*, they must accompany the submission with a letter of submission in which they declare, among other things, that they have read and approved the submitted manuscript in its content, organization, presentation, and order of authorship, so that no conflict of interest exists between them. In the letter, the authors can also request that a person not be chosen as an evaluator couple when they consider that a conflict of interest could arise.

The members of the Editorial Board, who act as commissioned editors within the journal, have the responsibility to declare whether they have a conflict of interest with the assigned manuscript. Similarly, peer reviewers must declare whether they present a conflict of interest by knowing the name of the authors of the assigned manuscript, considering that the evaluation process in the journal is single-blind.

**Author's responsibilities:** Authors are required to participate in the evaluation process by respecting the stipulated review times and meeting deadlines. Manuscripts that take more than sixty (60) days when corrections are requested will be automatically withdrawn from the journal and must be resubmitted, except in duly justified cases.

The submission of a manuscript must be accompanied by a letter addressed to the journal's editor-in-chief, where the authors sign and declare that:

- All of them have read and approved the manuscript submitted in its content, organization, presentation, and order of authorship, so there is no conflict of interest.



- El manuscrito es resultado de un trabajo original, el cual no ha sido publicado, no se encuentra bajo consideración en ninguna publicación y no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del comité editorial del *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*.
- En caso de que el manuscrito sea aceptado, se autoriza su publicación, reproducción y difusión bajo las normas y licenciamiento establecidos por la revista.
- El documento no incluye textos, tablas o figuras con reserva de derechos. Si los tuviere, se cuenta con la autorización para su uso y reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carecen de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se aceptan los términos y condiciones expresados por la revista en la guía de autores.

**Responsabilidades de los evaluadores:** los evaluadores son investigadores invitados por la revista para que revisen *ad honorem* los manuscritos sometidos. Cada semestre se incluye al inicio del número correspondiente el listado de evaluadores que participaron en la revisión de los manuscritos publicados. Sus funciones son las siguientes:

- Evaluar los manuscritos asignados y emitir una decisión debidamente justificada.
- Adoptar una posición imparcial, crítica y constructiva frente a los trabajos que evalúan.
- Proteger el carácter confidencial de los manuscritos que revisan.
- Declarar si presentan conflicto de intereses.

**Responsabilidad del comité editorial:** el comité editorial es responsable de la gestión de la revista. Está integrado por investigadores de entidades nacionales e internacionales, asegurando la presencia de pluralidad en las disciplinas y líneas de investigación marina y costera. Sus funciones son las siguientes:

- Garantizar la calidad del contenido de los artículos y notas científicas sometidos a la revista.
- Declarar si presentan conflicto de intereses.
- Proteger la integridad y confidencialidad del trabajo de cada autor y el anonimato de cada evaluador.
- Aceptar o rechazar los manuscritos sometidos.
- En el caso de errores, promover la corrección o retractación en la publicación.

**Sanciones:** en caso de encontrar alguna violación de los apartes anteriores, se aplicarán las siguientes sanciones:

- Rechazo inmediato y retiro del manuscrito de la revista.
- Prohibición a todos los autores para presentar nuevos manuscritos a la revista, ya sea de forma individual o colectiva. Esta sanción tendrá vigencia por dos años a partir de su notificación.
- El editor general y el director de la revista se reservan el derecho de imponer sanciones adicionales a las descritos anteriormente, si lo consideran necesario.

- The manuscript is the result of an original work, which has not been published, is not under consideration in any publication, and will not be submitted to another journal until to know the response of the Editorial Board of the *Bulletin of Marine and Coastal Research*.
- If the manuscript is accepted, its publication, reproduction, and dissemination are authorized under the rules and license established by the journal.
- The manuscript does not include text, tables, or figures with copyright. If you have them, you have the authorization for their use and reproduction.
- The manuscript does not contain citations or transcriptions of works that lack properly cited bibliographic references.
- All of them accept all terms and conditions expressed in the author's guide.

**Reviewers' responsibilities:** Reviewers are researchers invited by the journal to revise *ad honorem* the manuscripts submitted. Every semester, the respective volume includes at the beginning of the complete list of reviewers who participated in the review. The functions of the reviewers are:

- Evaluating assigned manuscripts and give a substantiated decision.
- Adopting an impartial, critical and constructive position towards the manuscripts they evaluate.
- Protecting the confidentiality of the manuscripts reviewed.
- Declaring whether there is a conflict of interest.

**Editorial Board responsibilities:** The Editorial Board is responsible for the journal's management. It is composed of researchers from national and international institutions, ensuring plurality in the different disciplines and research lines of marine and coastal topics. The functions of the Editorial Board are:

- Guaranteeing the quality of the articles and scientific notes submitted to the journal.
- Declaring whether there is a conflict of interest.
- Protecting the integrity and confidentiality of the author's work and the anonymity of each reviewer.
- Accepting or refusing the submitted manuscripts.
- Promoting correction or retraction in the publication, in case of errors.

**Sanctions:** In any violation of the above paragraphs, the following sanctions will be applied:

- Immediate rejection and withdrawal of the manuscript from the journal.
- Prohibition for all authors to submit new manuscripts to the journal, either individually or collectively. This sanction will be in force for two years from its notification.
- The general editor and the director of the journal reserve the right to impose additional sanctions to those described above, if they consider it necessary.

# BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS

## Bulletin of Marine and Coastal Research

(Bol. Invest. Mar. Cost.)

Vol. 53 (2) . . . . . Santa Marta, Colombia, 2024 (jul-dic / *Jul-Decx*)

---

### TABLA DE CONTENIDO / CONTENTS

---

#### ARTÍCULOS / ARTICLES

**Pedro Ramiro Castillo, Marilú Bouchon, Daniel Grados y Renato Guevara-Carrasco**

Actores que intervienen en las recomendaciones de la cuota de pesca en la anchoveta (*Engraulis ringens*) en Perú  
Actors involved in the recommendations of the fishing quota for Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*) . . . . . 11

**Diocelina Huaman-Fernández, Paul M. Baltazar-Guerrero, Samuel J. Arbaiza-Quispe y Orlando Advíncula Zeballos**

Evaluación en la formación de discos de fijación secundaria de *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) en condiciones de cultivo semi-controladas  
Evaluating the formation of secondary attachment discs of *Chondracanthus chamissoi* (yuyo) under semi-controlled cultivation conditions . . . . . 31

**Santiago González-Rojas, Jorge Paramo, Silvia Salas C., Sigmer Quiroga, José Cusba, Samuel Núñez y Adolfo Sanjuan-Muñoz**

Hábitos alimentarios del bonito *Euthynnus alletteratus* y la albacora *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) en el Caribe colombiano  
Feeding habits of bonito *Euthynnus alletteratus* and albacore *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) in the Colombian Caribbean. . . . . 45

**Willian Ruiz-Ipanaque, Paul Baltazar-Guerrero, Max Castañeda-Franco y Arturo Mires-Reyes**

Capacidad regenerativa post-cosecha de la macroalga roja *Chondracanthus chamissoi* en dos sistemas de cultivo en la costa centro-sur del Perú  
Post-harvest regenerative capacity of the red macroalgae *Chondracanthus chamissoi* in two culture systems in the south-central coast of Peru . . . 67

**José Francisco Valverde Calderón y Gustavo Barrantes Castillo**

Variación del nivel del mar en el Caribe de Costa Rica, Centroamérica  
Sea level variation in the Caribbean of Costa Rica, Central America . . . . . 85

**Julio César Herrera Carmona, Johanna Prüssmann Uribe, Melissa Abud Hoyos y Luis Alonso Zapata**

Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia  
Vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socio-ecosystem in Colombia . . . . . 103

**Erick Méndez-Macias y Geovanna Parra-Riofrío**

Impacto de la alimentación automática sobre la calidad del suelo en cultivo de *Litopenaeus vannamei*  
Impact of automatic feeding on soil quality in *Litopenaeus vannamei* cultivation . . . . . 133



## ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

**Ángela Pacheco Flores-de-Valgaz, Estefany Lema Choez, Jaime Naranjo-Morán y Patricia Manzano Santana**

Macroalgas rojas: una alternativa ecológica para la agricultura sostenible del Ecuador

Red macroalgae: an ecological alternative for sustainable agriculture in Ecuador . . . . . 143

## NOTAS / NOTES

**Alexander Lopeztegui-Castillo**

Forma atípica de estrella de mar del género *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) encontrada en el golfo de Batabanó, Cuba, Mar Caribe.

Atypical sea star of the genus *Oreaster* (Echinodermata: Asteroidea) found in the Gulf of Batabanó, Cuba . . . . . 169

**Guía de autores / Author's guide** . . . . . 177

**Ética de publicación / Publication ethics** . . . . . 182



**invemar**

[www.invemar.org.co/boletin](http://www.invemar.org.co/boletin)