

Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras

Since 1967



 *Hypoplectrus providencianus* Isla de San Andrés
Alberto Rodríguez-Ramírez

Serie de Publicaciones Periódicas

Volumen 54 (2)

Año 2025 (Julio-Diciembre / July-December)



Santa Marta • Colombia

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

BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS

(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 SciELO, en Scopus (ubicándose en el Q2 del Scimago Journal Ranking (SJR) y en Publindex.

El Boletín es una publicación completamente **bilingüe** (inglés y español) de **libre acceso**, que puede ser consultada en <http://boletin.invemar.org.co> 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 **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras** 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, SciELO, Scopus (in Q2 of Scimago Journal Ranking - SJR) and on Publindex.

The Boletín is a **bilingual** (English and Spanish) and an **open access** publication, which can be consulted on <http://boletin.invemar.org.co> 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 **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras** 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 journal 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

Adolfo Sanjuan Muñoz, *PhD*

Universidad Tadeo Lozano, Colombia

 0000-0002-4786-862X

Alberto Ordinola Zapata, *PhD*

Universidad Nacional de Tumbes, Perú

 0000-0002-9644-0531

Arturo Acero Pizarro, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia sede Caribe (Cecimar), Colombia

 0000-0002-6637-9901

Brigitte Gavio, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

0000-0001-5364-3374

Cristopher Camargo Roa, *PhD*

Universidad de Los Andes, Venezuela

 0000-0003-1867-4591

Diego L. Gil Agudelo, *PhD*

Lighthawk, EE. UU.

 0000-0001-7873-4694

Edgardo Londoño-Cruz, *PhD*

Universidad del Valle, Colombia

 0000-0001-5762-9430

Gabriel R. Navas S., *PhD*

Universidad de Cartagena, Colombia

 0000-0001-9554-6345

Gladys Bernal, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia

 0000-0001-6333-6028

Javier A. Díaz Ochoa, *PhD*

Universidad de Magallanes, Chile

 0000-0002-1911-0467

José Julián Tavera, *PhD*

Universidad del Valle, Colombia

 0000-0003-4517-9238

José Iannacone, *PhD*

Universidad Científica del Sur, Perú

 0000-0003-3699-4732

Julio César Herrera Carmona, *PhD*

Universidad del Valle, Colombia

 0000-0003-0446-3275

Marco Alejandro Correa, *PhD*

Invemar, Colombia

 0000-0002-4714-9553

María Adriana Gracia Clavijo, *PhD*

Universidad del Atlántico, Colombia

 0000-0002-4771-5295

María del Pilar Blanco Parra, *PhD*

Universidad de Quintana Roo, México

 0000-0003-2492-2168

María Isabel Ciales, *PhD*

Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia

 0000-0001-5608-8943

Maribeb Castro, *PhD*

Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

 0000-0001-6353-1018

Mateo López Victoria, *Dr.rer.nat.*

Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia

 0000-0002-7307-8680

Nikita Gaibor, *PhD*

Instituto Nacional de Pesca, Ecuador

 0000-0002-4773-3434

Nixon Bahamon, *PhD*

Institute of Marine Sciences, España

 0000-0002-5802-7367

Óscar Álvarez Silva, *PhD*

Universidad del Norte, Colombia

 0000-0002-5121-5875

Paul Martín Baltazar Guerrero, *PhD*

Universidad Científica del Sur, Perú

 0000-0003-4071-4772

Valentina Hurtado-McCormick, *PhD*

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO),
Environment Perth, WA, Australia

 0000-0001-9407-5924

Comité científico / Scientific Board

Andia Chávez Fonnegra, <i>PhD</i> Florida Atlantic University, EE. UU.	 0000-0002-6781-0089
Alfredo Gómez Gaspar, <i>MSc</i> Museo Marino de Margarita y Universidad de Oriente (Nueva Esparta), Venezuela	 0000-0002-2430-2738
Efraín Rodríguez Rubio, <i>PhD</i> Centro de Innovación y Tecnología-ICP y Ecopetrol, Colombia	 0000-0002-1150-3194
Gloria E. Sánchez, <i>PhD</i> Universidad de Magallanes, Chile	
Guillermo Díaz Pulido, <i>PhD</i> Griffith University, Australia	 0000-0002-0901-3727
Jorge Enrique Páramo, <i>PhD</i> Universidad del Magdalena, Colombia	 0000-0002-8380-2716
José Horrillo Caraballo, <i>PhD</i> Swansea University, Reino Unido	 0000-0001-7694-3812
Juan Manuel Díaz, <i>Dr.rer.nat.</i> Fundación Marviva, Colombia	 0000-0002-2026-6522
Klaudia Hernández, <i>PhD</i> Universidad Andrés Bello, Chile	 0000-0002-8490-2882
Luisa Espinosa, <i>PhD</i> Invemar, Colombia	 0000-0003-1452-3104
Marie Luise Schnetter, <i>Dr.rer.nat.</i> Justus-Liebig-Universität Gießen, Alemania	
Mónica Puyana, <i>PhD</i> Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia	 0000-0001-7600-3118
Yves François Thomas, <i>PhD</i> Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Francia	 0000-0003-1896-0774

Evaluadores de este número / Reviewers for this issue

Alberto Ordinola, <i>PhD</i>	Universidad Nacional de Tumbes, Perú
Andrea Polanco, <i>PhD</i>	Universidad Nacional de Colombia Colombia
Brigite Gavio, <i>PhD</i>	Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Daniel Isaías Grados Paredes, <i>PhD</i>	Imarpe Perú
Diego Gil, <i>PhD</i>	University of Alabama in Huntsville-NASA, EEUU
Hernán Alejandro Henao Castro, <i>PhD</i>	Universidad de Cartagena, Colombia
José Armando Santiago Rivera, <i>PhD</i>	Universidad de Los Andes, Venezuela
José Giovanni Jesús Ávila Peltroche, <i>PhD</i>	Carnegie Science, BSE, EEUU
José Julián Tavera, <i>PhD</i>	Universidad del Valle, Colombia
José Luis Godínez Ortega, <i>PhD</i>	Universidad Autónoma de México
José Valverde, <i>MSc</i>	Universidad Nacional de Costa Rica, Costa Rica
Antonio Baeza, <i>PhD</i>	Clemson University y Smithsonian Marine Station at Fort Pierce, EE. UU.
José Valverde, <i>MSc</i>	Universidad Nacional de Costa Rica, Costa Rica
Julio Herrera Carmona, <i>PhD</i>	Universidad del Valle, Colombia
Laura Espinosa-Asuar, <i>PhD</i>	Universidad Autónoma de México
Manuela Corrales, <i>MSc</i>	Universidad Nacional de Colombia Colombia
Mayra Medina, <i>PhD</i>	UPEL, Venezuela
Néstor Ardila, <i>PhD</i>	Universidad del Rosario, Colombia
Nicolás Alberto Alegría Landeros	Biol. Mar. Universidad de Concepción, Chile
Óscar Álvarez Silva, <i>PhD</i>	Universidad del Norte, Colombia
Oscar Felipe Díaz Díaz, <i>PhD</i>	FAUNAMAR Ltda. Chile

Jefe de Comunicación Científica / Head of Scientific Communication

Isabela Katime Arroyave, Invemar, Colombia

Traducción / Translation

Seis artículos de este número fueron traducidos con IA mediante *Smartcat* y luego revisados y aprobados por sus autores. / Six articles in this issue were translated using AI via *Smartcat* and later reviewed and approved by their authors

Foto portada / Cover Photo

Hypoplectrus providencianus, Alberto Rodríguez-Ramírez, 2006

Canje / Exchange

Centro de Documentación / Documentation Center (CDO)
E-mail: bibliote@invemar.org.co

Asistente del comité editorial / Editorial Board Professional

Tatiana Gómez Orgulloso, *MSc*, Invemar, Colombia

Diagramación y montaje / Layout and Assembly

Alejandra Ramírez (Invemar)

Boletín en línea / Online Bulletin

<http://boletin.invemar.org.co>



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 Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras is under Creative Commons license
BY-NC-SA 4.0



Citar los artículos / Citation Style:
Autores. 2025. Título del artículo. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): rango de páginas.
Authors. 2025. Title of article or note. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): page range.

BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS

(Bol. Invest. Mar. Cost.)

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

54 (2)



Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras

“José Benito Vives de Andrés”

Vinculado al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Santa Marta, Colombia, 2025 (Julio - Diciembre / July-)

Dr. Jörn Geister

Jörn Geister nació el 29 de octubre de 1940 en Würbenthal, en la región de Moravia-Silesia (actual República Checa), en medio de la agitación de la Segunda Guerra Mundial. La familia se vio obligada a emigrar a Alemania, estableciéndose finalmente en el estado de Baden-Württemberg. En 1960, Jörn culminó su bachillerato en el Wagenburg-Gymnasium de Stuttgart, especializándose en matemáticas y ciencias naturales. Entre 1961 y 1967 estudió geología y paleontología en la Universidad de Stuttgart, donde obtuvo su diploma tras realizar su tesis bajo la dirección del profesor Otto F. Geyer.

Gracias a una beca de posgrado gestionada por Geyer, entre 1968 y 1970 Jörn realizó pasantías en la Universidad de Cartagena y en el entonces Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas (hoy Invemar) en Santa Marta, incluyendo una estancia en San Andrés, iniciando sus estudios sobre los arrecifes coralinos del Caribe. Tras un breve regreso a Alemania, Jörn volvió a San Andrés para llevar a cabo el trabajo de campo de su tesis doctoral, titulada “Andamiaje arrecifal e historia de la evolución geológica de la isla de San Andrés (Caribe occidental, Colombia)” (traducción libre del alemán), dirigida por Geyer. La defendió con éxito en agosto de 1973, consolidando su vínculo con el archipiélago sanandresano, cuyas gentes y paisajes se quedarían para siempre en su corazón.

Como profesor de la Universidad de Berna impartió cursos regulares de macro y micropaleontología, estratigrafía y geología histórica, pero su verdadera pasión era el trabajo de campo. Además, organizó eventos y seminarios sobre arrecifes del Cuaternario, esclerocronología y ecología aplicada de arrecifes recientes. Fue presidente de la Sociedad Paleontológica Suiza entre 1987 y 1988. A partir de 1992, impulsado por la nostalgia de su estancia como joven investigador en San Andrés dos décadas atrás, Jörn se propuso visitar la isla al menos cada dos años antes de su jubilación.

Lo conocí en marzo de 1994 cuando me encontraba preparando el proyecto “Evaluación ecológica y ambiental de las áreas arrecifales del Caribe colombiano” (1994-1999), auspiciado por Colciencias y ejecutado por Invemar, con el apoyo de Coralina y la Universidad Nacional de Colombia. El nombre de Jörn Geister

El reconocido esquema de zonación (wave zones) de los arrecifes coralinos del Caribe de Geister (1977).

A partir de entonces, Jörn se integró a nuestro equipo de investigación y se convirtió en una pieza clave del proyecto y, con el tiempo, en un amigo entrañable. Fue un compañero incansable en largas jornadas de campo, ya fuera buceando, caminando, en embarcaciones o compartiendo comidas. Recuerdo con cariño nuestras conversaciones interminables y cómo compartía sus conocimientos con todo el equipo, a menudo disfrutando de un rum punch. Su curiosidad, entusiasmo y perspectiva diacrónica de los arrecifes fueron cruciales para el éxito del proyecto. Lo recuerdo buceando y haciendo snorkel durante horas, siempre con su martillo de geólogo, su cámara Nikonos y vestido con su eterno pantalón de pana y camisa a cuadros marrón y verde (jamás usó un wetsuit).



El autor y Jörn Geister a bordo del B/I Ancón, expedición a Quitasueño, agosto de 1998

En 1998 lo visité en Berna, donde conocí a su esposa Marion y a tres de sus cuatro hijos. Durante esa estancia, diseñamos la excursión poscongreso a los arrecifes del archipiélago, en el marco del VII International Coral Reef Symposium (Panamá, 1996), la cual incluyó un sobrevuelo del archipiélago y visitas a los arrecifes de San Andrés y Providencia, con la participación de destacados especialistas, como el legendario David R. Stoddart y Reinhold Leinfelder (actual director del Museo de Historia Natural de Berlín). La experiencia me inspiró para organizar más excursiones y cursos de campo desde Invermar y luego desde la Universidad Nacional de Colombia.

Se jubiló en 2006, pero siguió como colaborador *ad honorem* del Museo de Historia Natural de Berna, asesorando tesis y viajando ocasionalmente a Colombia. Su vínculo con San Andrés lo llevó a documentar mediante fotografías submarinas (siempre desde los mismos puntos) el deterioro de los arrecifes a lo largo de 30 años (publicaciones en 1999, 2000, 2001 y 2012). A lo largo de su carrera, Jörn publicó 78 trabajos: 30 artículos, 3 libros, 11 memorias de eventos y 3 guías de campo. Treinta de ellas surgieron como resultado de sus trabajos en Colombia (la mayoría en San Andrés y Providencia) o se inspiraron en estos. Tuve el honor de compartir con Jörn la autoría en seis

de sus publicaciones, la última (2008) un libro que sintetizó el conocimiento sobre los arrecifes y la historia geológica del archipiélago, el cual se constituyó en un aporte relevante a los argumentos de Colombia ante el Tribunal de la Haya en el marco del litigio fronterizo con Nicaragua.

Jörn fue un maestro excepcional, un colega brillante y un amigo leal. Poseía esa rara combinación de sencillez, erudición, rigor y calidez. Era paciente, tranquilo y humilde. Tras años luchando contra una enfermedad, falleció el 18 de enero pasado. Su recuerdo y su legado perdurarán en Marion, sus cuatro hijos, sus seis nietos y en todos los que aprendimos, compartimos y disfrutamos de su compañía.

Publicaciones de Jörn Geister sobre arrecifes colombianos o inspirados en sus observaciones en Colombia

Geister, J. 1969. Contribución al conocimiento de los arrecifes de barlovento al norte de la isla de San Andrés (mar Caribe, Colombia). Primer Congr. Col. Geol., Univ. Nal. Col., Bogotá (resumen).

Geister, J. 1972. Zur Ökologie und Wuchsform der Säulenkoralle *Dendrogyra cylindrus* Ehrenberg, Beobachtungen in den Riffen der Insel San Andrés (Karibisches Meer, Kolumbien). Mitt. Inst. Colombo-aleman Invest. Cient., 6: 77–87.

- Geister, J. 1972. Nota sobre la edad de las calizas coralinas del Pleistoceno marino en las islas de San Andrés y Providencia (mar Caribe occidental, Colombia). Mitt. Instituto Colombo-alemán Invest. Cient., 6: 35–140.
- Geister, J. 1973. Los arrecifes de la isla de San Andrés (mar Caribe, Colombia). Mitt. Inst. Colombo-alemán Invest. Cient., 7: 211–228.
- Geister, J. 1973. Pleistozäne und rezente Mollusken von San Andrés (Karibisches Meer, Kolumbien) mit Bemerkungen zur geologischen Entwicklung der Insel. Mitt. Inst. Colombo-alemán Invest. Cient., 7: 229–251.
- Geister, J. 1975. Riffbau und geologische Entwicklungsgeschichte der Insel San Andrés (westliches Karibisches Meer, Kolumbien). Stutt. Beitr. Naturk., ser.B, 15, 203 p.
- Geister, J. 1976. Los arrecifes de barlovento al norte de la isla de San Andrés: 163-186. Mem. Primer Congr. Col. Geol. (1969), Univ. Nal. Col., Bogotá..
- Erfa, A. und J. Geister. 1976. Über ein holozänes Korallen und Mangroven-vorkommen nahe Santa Marta, Kolumbien. Mitt. Inst. Colombo-alemán Invest. Cient., 8: 165–186.
- Geister, J. 1977. The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. Proc. III Internat. Coral Reef Symp. (Miami 1977), 1 (Biology): 23–29.
- Geister, J. 1977. Occurrence of *Pocillopora* in late Pleistocene Caribbean coral reefs. II Symp. Internat. Coraux et Récifs Corall. Fossiles. Mém. Bur. Rech. Géol. Miniér., 89: 378-388.
- Geister, J. 1978. Recent coral reefs and geologic history of Providencia Island (western Caribbean Sea, Colombia): 22. Segundo Congr. Col. Geol.
- Geister, J. 1980. Calm-water reefs and rough-water reefs of the Caribbean Pleistocene. Acta Palaeontol. Pol., 25(3-4): 541-556.
- Geister, J. 1980. Morphologie et distribution des coraux dans les récifs actuels de la mer des Caraïbes. Ann. dell'Univ. Ferrara, 6: 15–28.
- Geister, J. 1983. Holozäne westindische Korallenriffe: Geomorphologie, Ökologie und Fazies. Facies, 9: 173–284.
- Geister, J. 1984. Récifs pleistocènes de la mer des Caraïbes: aspects géologiques et paléoécologiques: 3.1-3.4. In Geister, J. et R. Herb (Eds). Géologie et paléoécologie des récifs. Inst. Géol. ogie l'Univ. Berne.
- Geister, J. 1984. Géomorphologie, écologie et faciès des récifs actuels des Caraïbes: conséquences pour l'interprétation des récifs fossiles: 1.1-1.14. In Geister, J. et R. Herb (Eds). Géologie et paléoécologie des récifs. Inst. Géol. l'Univ. Berne.
- Geister, J. 1985. Recent coral reefs of the Colombian Pacific coast. Fossil Cnidaria, 14(2): 20–21.
- Geister, J. 1986. Recent coral reefs and geologic history of Providencia Island (western Caribbean Sea, Colombia). Geol. Col., 15: 115–134.
- Geister, J. 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (western Caribbean Sea, Colombia). Facies, 27: 1–70.
- Díaz, J.M., G. Díaz-Pulido, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, J.A. Sánchez y S. Zea, S. 1996. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. Serie Publ. Esp. Invenmar, 2, 83 p.
- Geister, J. and J.M. Díaz. 1997. A field guide to the atolls and reefs of San Andrés and Providencia (Colombia). Proc. VIII Internat. Coral Reef Symp., Panama, 1: 235-262.
- Díaz, J.M., J.A. Sanchez and J. Geister. 1997. Development of lagoonal reefs in oceanic reef complexes of the southwestern Caribbean: Geomorphology, structure and distribution. Proc. VIII Internat. Coral Reef Symp., Panama, 2: 779–784.
- Zea, S., J. Geister, J. Garzón-Ferreira and J.M. Díaz. 1998. Biotic changes in the reef complex of San Andrés Island (southeastern Caribbean Sea, Colombia) occurring over nearly three decades. Atoll Res. Bull., 456: 1–30
- Geister, J. 1999. 30 Jahre im Leben eines karibischen Korallenriffes. Profil, 16: 1–11.
- Díaz, J.M., L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G.H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F.A. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. Ser. Publ. Esp. Invenmar, 5, 176 p.
- Geister, J. 2000. Time-traveling through a modern Caribbean coral reef: 1. VIII Meeting Swiss Sedimentol., Fribourg.
- Geister, J. 2001. Un viaje a través del tiempo en los arrecifes de la isla de San Andrés (mar Caribe, Colombia): 66-68. IX Congr. Latinoam. Cienc. Mar.
- Geister, J. 2001. Coral life and coral death in a recent Caribbean coral reef: A thirty-year record photographs. Bull. Tohoku Univ. Mus., 1: 113–123.
- Geister, J. y J.M. Díaz. 2007. Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia), con guía de campo (en español e inglés). Inst. Nal. Invest. Geol. Min. (Ingeominas), Bogotá. 114 p.
- Geister, J. 2012. Time travelling in a Caribbean coral reef (San Andrés Island, western Caribbean, Colombia): 7-17. XV Symp. Geol. Bahamas Carb. Reg.

Autor: Juan Manuel Díaz, PhD, jmdiazster@gmail.com

Tabla de contenido / Contents

ARTÍCULOS / ARTICLES

María del Carmen Altamirano-Cerecedo, Francisco Omar López-Fuerte, Juan Manuel López-Vivas, Elisa Serviere-Zaragoza y Karla León-Cisneros Dos siglos de conocimiento sobre el género <i>Dictyota</i> (Phaeophyceae, Dictyotales): un enfoque histórico Two centuries on the knowledge of the genus <i>Dictyota</i> (Phaeophyceae, Dictyotales), A Historical Approach	11
Grecia Montalvo-Fernández, Joanna M. Ortiz-Alcantara, Claudia Durruty-Lagunes y María Leticia Arena-Ortiz Identificación molecular de la microbiota intestinal cultivable de <i>Epinephelus morio</i> (mero rojo) y su potencial probiótico Molecular identification of culturable gut microbiota of <i>Epinephelus morio</i> (red grouper) and its probiotic potential	32
Sofía Cielo Chung-Velásquez, Paul M. Baltazar Guerrero y Max S. Castañeda Franco Evaluación del potencial reproductivo de <i>Gracilariopsis lemaneiformis</i> (Gracilariales: Rhodophyta) en San Andrés, Pisco-Perú Evaluation of the reproductive potential of <i>Gracilariopsis lemaneiformis</i> (Gracilariales: Rhodophyta) in San Andres, Pisco-Peru	53
Luis La Cruz, Cristián Henríquez-Pastene, Adrian Ibieta y Francisco Leiva-Dietz Estimación de tallas de anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>) mediante ecosonda en áreas pesqueras de difícil acceso en la Región de Atacama, Chile Length estimation of anchovy (<i>Engraulis ringens</i>) using echosounder in difficult to access fishing areas in the Atacama Region, Chile	70
Diego Alexander Blandón- Pulgarin y Mario Londoño Lista de especies y bibliografía de eunicidos (Eunicidae: Polychaeta: Annelida) del Caribe colombiano List of species and bibliography of eunicids (Eunicidae: Polychaeta: Annelida) from the Colombian Caribbean	90
Alberto Boretti Investigación de la subsidencia antropogénica en Fremantle, Australia Occidental, mediante GPS, altimetría por satélite y datos de mareógrafos Investigating anthropogenic subsidence in Fremantle, Western Australia, using GPS, satellite altimetry, and tide gauge data	100
Lady Roa, Yesid Benítez y Daniel Guerrero Apropiación social de la ley 2268 de 2022 a través de herramientas lúdicas: estrategias educativas para pescadores artesanales en tumaco y buenaventura Social appropriation of law 2268 of 2022 through playful tools: educational strategies for artisanal fishermen in tumaco and buenaventura	134

NOTAS / NOTES

Raúl Navas-Camacho, Elizabeth Galeano-Galeano, Andrés Felipe Acosta-Chaparro, Laura Sánchez-Valencia y Adriana Daza	
Primer registro de la formación coralina de Bahía Honda, La Guajira, Colombia	
First report of the coral formation of Bahía Honda, Guajira, Colombia	161
 Alberto Rodriguez-Ramirez y Nelson Alejandro Lozano Mendoza	
Descubrimiento de la vaca enmascarada <i>Hypoplectrus providencianus</i> (Serranidae) en la costa noroccidental de América del Sur.	
Discovery of the masked hamlet <i>Hypoplectrus providencianus</i> (Serranidae) in the coast of northwestern South America.	171
 Guía de autores / Author's guide	 176
 Ética de publicación / Publication ethics	 203



ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

Dos siglos de conocimiento sobre el género *Dictyota* (Phaeophyceae, Dictyotales): un enfoque histórico

Two centuries of knowledge on the genus *Dictyota* (Phaeophyceae, Dictyotales): a historical approach

María del Carmen Altamirano-Cerecedo^{1,2}

0000-0002-3062-5744

malt@uabcs.mx

Francisco Omar López-Fuerte²

0000-0002-0828-9107

folopez@uabcs.mx

Juan Manuel López-Vivas²

0000-0002-3417-1153

jmlopez@uabcs.mx

Elisa Serviere-Zaragoza³

0000-0003-2385-3527

serviere04@cibnor.mx

Karla León-Cisneros²

0000-0002-6929-927X

kleon@uabcs.mx

1. Departamento Académico de Economía, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Boulevard Forjadores s/n Col. Universitario, La Paz, Baja California Sur, 23080. México.

2. Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Boulevard Forjadores s/n Col. Universitario, La Paz, Baja California Sur, México 23080.

3. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIB-NOR), Calle IPN 195, Col. Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur, 23096. México

* Autor de correspondencia / Corresponding author

Recibido / Received: 17/10/2024

Aceptado / Accepted: 06/03/2025

Citación / Citation: Altamirano-Cerecedo, M.C.; López-Fuerte, F.O.; López-Vivas, J.M.; Serviere-Zaragoza, E.; León-Cisneros, K. 2025. Two centuries of the knowledge of the genus *Dictyota* (Phaeophyceae, Dictyotales): a historical approach. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 11-31

RESUMEN

La mayoría de las recientes revisiones sistemáticas en macroalgas son concisas y descriptivas. Las revisiones que se enfocan en un solo tema aún son escasas, pero son importantes para facilitar una visualización de los tipos de investigaciones publicadas, los métodos relevantes y las áreas de oportunidad. El objetivo de este estudio fue elaborar un estado del arte respecto al conocimiento sobre *Dictyota*, con base en una revisión sistemática de la información generada desde su descripción. Se realizó una búsqueda tanto de nombres como de publicaciones en diferentes bases de datos, seguido de un análisis temporal (por siglos y vicenios). Hasta la fecha, un total de 318 nombres han sido registrados para *Dictyota*, de los cuales 110 son actualmente aceptados taxonómicamente. El mayor número de nombres (211) fue registrado durante el siglo XIX, lo que se derivó principalmente de las grandes expediciones. El análisis de la literatura incluyó 206 publicaciones, 88 de taxonomía alfa, 74 de taxonomía beta y 44 de taxonomía gamma. Se observa una tendencia hacia la taxonomía integrativa, incluyendo diversas disciplinas para abordar aspectos más allá de la descripción taxonómica. Nuestros hallazgos resaltan la necesidad de realizar revisiones extensivas y monográficas de taxonomía integrativa para mejorar nuestro entendimiento de la sistemática de *Dictyota*, un género desafiante.

Palabras clave: taxonomía alfa; taxonomía beta; taxonomía gamma; macroalgas; taxonomía integrativa

ABSTRACT

Most current systematized reviews of macroalgae are concise and descriptive. Reviews focusing on a single topic remain scarce, but they are important to facilitate visualizations of the types of published research, relevant methods, and areas of opportunity. This study aimed to elaborate on the state-of-the-art in the knowledge of *Dictyota* based on a systematic review of the information generated worldwide since its original description. We conducted a search for names and studies in different databases, followed by a temporal analysis (by century and vicennium). To date, a total of 318 names have been registered for *Dictyota*, of which 110 are accepted names. The largest number of registered taxonomic names (211) was found for the 19th century, mainly derived from large expeditions. Our literature analysis involved 206 publications, 88 of which were on alpha taxonomy, 74 were on beta taxonomy, and 44 were on gamma taxonomy. We observed a trend towards integrative taxonomy, including diverse disciplines, in order to address aspects beyond taxonomic description. Our findings highlight the need for extensive reviews and monographies focused on integrative taxonomy to enhance our systematic understanding of *Dictyota*, a challenging genus.

Key words: alpha taxonomy; beta taxonomy; gamma taxonomy; macroalgae; integrative taxonomy.



INTRODUCCIÓN

Conocer el estado del arte sobre un tema de investigación permite que los científicos, de manera ágil y precisa, identifiquen teorías importantes, conceptos clave y autores destacados, además de definir los métodos más citados sobre un tópico o campo de estudio particular. Aunque los parámetros específicos que se utilizan para definir y evaluar estos aspectos difieren entre disciplinas —como la medicina y la biología—, los esfuerzos requeridos siempre se basan en el análisis del conocimiento publicado, en aras de catalogar y sistematizar la producción de un campo particular (Molina Montoya, 2005; Borenstein *et al.*, 2009).

En el caso de las macroalgas, estas revisiones sistemáticas tienden a enfocarse en temas específicos como la ecología, la importancia económica o la caracterización bioquímica (Sosa y Lindstrom, 1999; Williams y Smith, 2007; Miller *et al.*, 2011; Ulbricht *et al.*, 2013; Pal *et al.*, 2014; Makkar *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2017; Patarra *et al.*, 2019), y buscan contextualizar, organizar y analizar los datos producidos para cada tema, identificando, en algunos casos, áreas con carencias en la investigación existente. Algunas revisiones se han enfocado en géneros —como *Caulerpa* J.V. Lamouroux, *Dictyota* J.V. Lamouroux y *Meristotheca* J. Agardh— o en especies, brindando una descripción del conocimiento existente sobre diversos temas como la taxonomía, la ecología y la biogeografía, sin realizar un examen profundo (Zubia *et al.*, 2019; Bogaert *et al.*, 2020; Borlongan *et al.*, 2020). No obstante, las revisiones que se centran en un único tema como la taxonomía —si bien son más escasas— logran proporcionar análisis detallados y establecer recomendaciones para estudios futuros, como es el caso de la revisión sobre *Sargassum* C. Agardh (Mattio y Payri, 2011). Es importante realizar revisiones sobre un mayor número de taxones de macroalgas que tengan un enfoque temático, facilitando así la visualización de la investigación básica (e.g., biogeografía, filogeografía y ecología). Las especies del género *Dictyota* son muy comunes en hábitats intermareales y submareales someros a lo largo de las costas rocosas en todo el mundo. Si bien está presente en aguas templado-frías, este género presenta su mayor diversidad en ambientes tropicales y templado-cálidos, donde múltiples especies suelen coexistir y alcanzar densidades altas (Tronholm *et al.*, 2010a), especialmente en ambientes de arrecife de coral. Algunas especies constituyen una fuente de alimento o proporcionan sustrato y refugio a una variedad de organismos marinos (Cronin y Hay, 1996a, 1996b). Sin embargo, también se

INTRODUCTION

Knowing the state-of-the-art of a research topic allows scientists to quickly and accurately identify important theories, key concepts, leading authors, and defining methods which are most cited in a particular topic or field of study. While the specific parameters used to define and assess these aspects differ across disciplines, such as medicine and biology, the efforts required are always based on analyses of published knowledge with the aim for cataloguing and systematizing production in a particular field (Molina Montoya, 2005; Borenstein *et al.*, 2009).

In the case of macroalgae, these systematic reviews tend to focus on specific themes, such as ecology, economic importance or biochemical characterization (Sosa and Lindstrom, 1999; Williams and Smith, 2007; Miller *et al.*, 2011; Ulbricht *et al.*, 2013; Pal *et al.*, 2014; Makkar *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2017; Patarra *et al.*, 2019), and aim to contextualize, organize, and analyze the data produced for each theme, in some cases identifying areas where the existing research is lacking. Some reviews have focused on genera—such as *Caulerpa* J.V. Lamouroux, *Dictyota* J.V. Lamouroux, and *Meristotheca* J. Agardh— or species, providing a description of the existing knowledge in different topics, such as taxonomy, ecology, and biogeography, without an in-depth revision (Zubia *et al.*, 2019; Bogaert *et al.*, 2020; Borlongan *et al.*, 2020). However, reviews that focus on a single topic, such as taxonomy—although scarcer—manage to provide detailed analyses and establish recommendations for future studies, such as the review conducted on *Sargassum* C. Agardh (Mattio and Payri, 2011). It is important to conduct reviews of a greater number of macroalgal taxa, with a thematic focus, thus facilitating the visualization of basic research (e.g., taxonomic and nomenclatural reassessments), relevant methods (e.g., molecular techniques), and areas of opportunity and topics in the field (e.g., biogeography, phylogeography, and ecology). Species of the genus *Dictyota* are very common in intertidal and shallow subtidal habitats along rocky shores worldwide. Although present in cold-temperate waters, the genus reaches its highest diversity in tropical and warm-temperate environments, where multiple species often coexist and reach high densities (Tronholm *et al.*, 2010a), especially in coral reef environments. Some species constitute a food source or provide substrate and shelter to a variety of marine organisms (Cronin and Hay, 1996a, 1996b); however, the genus is also known to compete actively with other

sabe que este género compite activamente por sustrato con otros organismos como los corales (Beach *et al.*, 2003).

Las primeras descripciones de *Dictyota* fueron publicadas a mediados del siglo XVIII. La mayoría de las especies fueron descritas como *Fucus* Linnaeus (e.g., *F. fasciola* Roth o *F. implexus* Desfontaines) o *Ulva* Linnaeus. (e.g., *U. dichotoma* Hudson) (De Clerck, 2003). No fue sino hasta 1809 que Lamouroux estableció el nombre *Dictyota* (Lamouroux 1809a, 1809b). Desde su descripción y circunscripción, el género ha enfrentado varios desafíos taxonómicos, lo que ha llevado a reorganizaciones de nomenclatura, e.g., una sinonimia temprana con *Dichophyllum* Kützinger, que posteriormente fue revertida. Se han descrito otros géneros estrechamente relacionados (*Dilophus* J. Agardh, *Glossophora* J. Agardh, *Glossophorella* Nizammudin & A. Campbell, y *Pachydictyon* J. Agardh), pero en los siglos XX y XXI ocurrieron dos cambios importantes de taxonomía y nomenclatura. En primer lugar, *Dilophus* fue sinonimizado con *Dictyota* en 1992 (Hörnig *et al.*, 1992a, 1992b). En segundo lugar, en 2006, varios géneros relacionados fueron reducidos a la sinonimia dentro de *Dictyota*, y surgieron dos nuevos géneros (*Canistrocarpus* De Paula y De Clerck, y *Rugulopterix* De Clerck y Coppejans) a partir de especies antes pertenecientes a *Dictyota* (De Clerck *et al.*, 2006) (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de la historia de *Dictyota*, basado principalmente en De Clerck (2003).

organisms, such as corals, for substrate (Beach *et al.*, 2003).

The first descriptions of *Dictyota* species were published in the middle of the 18th century. Most *Dictyota* species were described as *Fucus* Linnaeus (e.g., *F. fasciola* Roth or *F. implexus* Desfontaines) or *Ulva* Linnaeus. (e.g., *U. dichotoma* Hudson) (De Clerck, 2003). It was not until 1809 that Lamouroux established the name *Dictyota* (Lamouroux 1809a, 1809b). Since its description and circumscription, the genus has faced several taxonomic challenges, resulting in nomenclatural shuffling: for example, earlier synonymy with *Dichophyllum* Kützinger, which was later reversed. Other closely related genera have been described (*Dilophus* J. Agardh, *Glossophora* J. Agardh, *Glossophorella* Nizammudin & A. Campbell, and *Pachydictyon* J. Agardh). However, in the 20th and 21st centuries, two major taxonomic and nomenclatural changes occurred. First, in 1992, *Dilophus* was synonymized with *Dictyota* (Hörnig *et al.*, 1992a, 1992b). Second, in 2006, several related genera were reduced to synonymy within *Dictyota*, and two new genera (*Canistrocarpus* De Paula and De Clerck and *Rugulopterix* De Clerck and Coppejans) emerged from former *Dictyota* species (De Clerck *et al.*, 2006); (see Table 1.)

Table 1. Summary of the history of *Dictyota*, mainly based on De Clerck (2003).

Author(Year)/Autor(Año)	Recorder genus/Género registrado	Nomenclaturals Changes/Cambios Nomenclaturales
Several authors such as Hudson (1762), Roth (1797), and Desfontaines (1799) (half of the 18th century). / En la mitad del siglo XVIII, varios autores como Hudson (1762), Roth (1797), y Desfontaines (1799).	Some species of <i>Fucus</i> and <i>Ulva</i> . / Algunas especies de <i>Ulva</i> y <i>Fucus</i> .	First descriptions of what would become <i>Dictyota</i> , such as <i>Ulva dichotoma</i> Hudson, <i>Fucus implexus</i> Desfontaines, <i>Fucus fasciola</i> Roth. / Primeras descripciones de especies que se convertirían en <i>Dictyota</i> , tales como <i>Ulva dichotoma</i> Hudson, <i>Fucus implexus</i> Desfontaines, <i>Fucus fasciola</i> Roth.

Author(Year)/Autor(Año)	Recorder genus/Género registrado	Nomenclatural Changes/Cambios Nomenclaturales
Lamouroux (1809a, 1809b)	<i>Dictyota</i> , divided into two sections: Dictyotaeae and Zonariaeae. / <i>Dictyota</i> , se dividió en dos secciones: Dictyotaeae y Zonariaeae.	Some species of <i>Ulva</i> and <i>Fucus</i> are transferred to the new genus <i>Dictyota</i> . / Algunas especies de <i>Ulva</i> y <i>Fucus</i> son transferidas al nuevo género <i>Dictyota</i> .
Agardh (1817)	<i>Dictyota</i>	Merged Dictyotées and Spongoidées with the Ulvacées. / Combinación de Dictyotées y Spongoidées con Ulvacées.
Kützing (1843)	<i>Dichophyllum</i> (new genus). / <i>Dichophyllum</i> (nuevo género).	<i>Dictyota</i> is synonymized with <i>Dichophyllum</i> . / <i>Dictyota</i> es sinonimizado con <i>Dichophyllum</i> .
Kützing (1849, 1859)	<i>Dictyota</i>	<i>Dichophyllum</i> is placed as synonym of <i>Dictyota</i> / Se establece <i>Dichophyllum</i> como sinónimo de <i>Dictyota</i>
Agardh (1848, 1882, 1894)	<i>Dictyota</i> , <i>Dilophus</i> , <i>Glossophora</i> (1882), <i>Pachydictyon</i> (1884)	Three new genera related to <i>Dictyota</i> emerged. / Surge tres nuevos géneros relacionado con <i>Dictyota</i> .
Hörnig <i>et al.</i> (1992a, 1992b)	<i>Dictyota</i>	<i>Dilophus</i> is synonymized with <i>Dictyota</i> . / <i>Dilophus</i> es sinonimizado con <i>Dictyota</i> .
Nizamuddin and Campbell (1995)	<i>Glossophorella</i>	New genus related to <i>Dictyota</i> emerged. / Surge nuevo género relacionado con <i>Dictyota</i> .
De Clerck <i>et al.</i> (2006)	<i>Dictyota</i>	<i>Glossophora</i> , <i>Pachydictyon</i> , <i>Glossophorella</i> are synonymized with <i>Dictyota</i> . / <i>Glossophora</i> , <i>Pachydictyon</i> , <i>Glossophorella</i> son sinonimizados con <i>Dictyota</i> .
	<i>Canistrocarpus</i> , <i>Rugulopteryx</i>	Two new genera emerged from former <i>Dictyota</i> species. / Surgen dos nuevos apartir de dos especies de <i>Dictyota</i> .

Los desafíos taxonómicos al interior de *Dictyota*, han incluido el reconocimiento del polimorfismo en algunas especies, que puede atribuirse a influencias ambientales y pleomorfismo a lo largo del ciclo de vida (Lamouroux, 1809a; De Clerck *et al.*, 2006; Tronholm *et al.*, 2010b). Estos factores han llevado al uso de características diagnósticas poco confiables en niveles

Taxonomic challenges within *Dictyota*, including the recognition of polymorphism in some species, may be attributed to environmental influences and pleomorphism throughout the life cycle (Lamouroux, 1809a; De Clerck *et al.*, 2006; Tronholm *et al.*, 2010b). These factors have led to the use of unreliable diagnostic characteristics at specific and infraspecific ranks, such as color,

específicos e infraespecíficos, como lo son el color, la longitud del talo, la presencia o ausencia de proliferaciones y el número de capas de células medulares. En consecuencia, las descripciones taxonómicas se han visto comprometidas, lo que ha dado lugar a interpretaciones taxonómicas y filogenéticas imprecisas (Solé y Foldats, 2003). Si bien el uso de características ultraestructurales y datos de secuencia genética han ayudado enormemente a delinear especies y ha resultado en la detección de múltiples entidades crípticas en *Dictyota*, conllevando una serie de cambios taxonómicos y de nomenclatura y la descripción de nuevas especies —e incluso una reinterpretación del género (De Clerck *et al.*, 2006; De Paula *et al.*, 2007; Tronholm *et al.*, 2010a)—, aún persisten dificultades significativas. Estas incluyen la optimización de los métodos de extracción de ADN (De Clerck *et al.*, 2001), las interpretaciones basadas en loci únicos y la limitación crucial de que las descripciones de especies no pueden basarse exclusivamente en datos moleculares. Este estudio tiene por objetivo establecer un panorama general del estado del arte respecto al conocimiento existente sobre *Dictyota*, con base en una revisión sistemática de descripciones de especies de *Dictyota* a nivel mundial, considerando los enfoques históricos de su clasificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta revisión sistematizada se dividió en dos etapas: (1) la búsqueda y el examen de nombres taxonómicos correspondientes al género *Dictyota* y (2) la búsqueda, selección y análisis de la literatura relacionada con este género. Para la búsqueda de nombres taxonómicos, se utilizó AlgaeBase (Guiry y Guiry, 2024) dado que contiene información nomenclatural, taxonómica (estatus del nombre y sinónimos) y biogeográfica (proporciona una lista de especies por área geográfica, e.g., región o país, así como una distribución detallada con fuentes para cada especie), así como datos bibliográficos sobre nombres taxonómicos. Para la búsqueda, la palabra *Dictyota* se utilizó como el único descriptor, pero también se consideraron todos los nombres específicos e infraespecíficos. Se obtuvo la siguiente información para cada taxón: nombre taxonómico, estatus taxonómico (actualmente aceptado, sinónimos, incierto, entrada preliminar de AlgaeBase), autoridad o autoridades, año de publicación y nombres relacionados. Los datos extraídos se registraron en una base de datos en hoja de cálculo para su posterior análisis. Para

thallus length, presence or absence of proliferations, and medullary cell layer number. Consequently, existing descriptions have been compromised, resulting in inaccurate taxonomic and phylogenetic interpretations (Solé and Foldats, 2003). While the use of ultrastructural characteristics and gene sequence data has greatly aided in the delineation of species and resulted in the detection of multiple cryptic entities in *Dictyota*, leading to a series of taxonomic and nomenclatural changes, descriptions of new species or genera—and, even, reinterpretation of the genus (De Clerck *et al.*, 2006; De Paula *et al.*, 2007; Tronholm *et al.*, 2010a)—significant difficulties persist. These include the optimization of DNA extraction methods (De Clerck *et al.*, 2001), interpretations based on single loci, and the critical limitation that species descriptions cannot rely solely on molecular data. This study aims to establish a state-of-the-art overview of the existing knowledge on *Dictyota*, based on a systematic review of worldwide *Dictyota* species descriptions, taking into consideration the historical approaches to its classification.

MATERIALS AND METHODS

The systematized review was divided into two stages: (1) the search for and examination of taxonomic names corresponding to the genus *Dictyota* and (2) the search for, selection, and analysis of literature related to this genus. For the taxonomic name search, Algaebase (Guiry and Guiry, 2024) was used as it contains nomenclatural, taxonomic (name status and synonyms), and biogeographic information (providing a list of species by geographic area, such as region or country, and a detailed distribution with sources for each species), as well as bibliographic data on taxonomic names. For the search, the word “*Dictyota*” was used as the only descriptor, but all specific and infraspecific names were also considered. The following information was obtained for each taxon: taxonomic name, taxonomic status (currently accepted, synonyms, uncertain, and preliminary AlgaeBase entry), authority or authorities, year of publication, and related names. The retrieved data were recorded in a spreadsheet database for subsequent analysis. For the analysis, the taxonomic names found in Algaebase were grouped into three categories: (1) accepted names (*i.e.*, names currently accepted); (2) synonyms; and (3) illegitimate names, which included uncertain or preliminary names in accordance with Guiry and Guiry (2024).

Then, a descriptive analysis was conducted to obtain the number

el análisis, los nombres taxonómicos encontrados en AlgaeBase fueron agrupados en tres categorías: (1) nombres aceptados (*i.e.*, nombres actualmente aceptados), (2) sinónimos y (3) nombres ilegítimos, lo que incluyó nombres preliminares o inciertos, de acuerdo con Guiry y Guiry (2024).

Acto seguido, se realizó un análisis descriptivo para obtener el número de nombres taxonómicos (por categorías), las autoridades (por taxón) y el número de géneros relacionados con el nombre *Dictyota*. Además, se llevó a cabo un análisis por siglos (XIX, XX y XXI) y periodos de 20 años (vicenios), lo que involucró el cálculo del promedio de nombres registrados y de autoridades por periodo. Se generó un catálogo de nombres taxonómicos (material suplementario) para datos como publicaciones válidas, tipo de localidad y sinónimos. En algunos casos, se proporcionó una nota.

La búsqueda de publicaciones sobre el género *Dictyota* se llevó a cabo en 11 bases de datos, *i.e.*, Academia, Biodiversity Heritage Library (BHL), Cambridge Scientific Abstract (CSA), Google Scholar, Journal Storage (JSTOR), ResearchGate, Scientific Electronic Library Online (SciELO) y (Science Direct), cubriendo el periodo entre 1809 y 2024. La búsqueda fue complementada con tres editoriales científicas adicionales: Blackwell Sinergy, Springer y Walter de Gruyter. Los descriptores utilizados fueron “*Dictyota*”, “*Dictyoteae*”, “*Dictyotaceae*”, “*Dictyotales*”, “*taxonomía*”, “*filogenia*”, “*biogeografía*”, “*filogeografía*”, “*filogeográfico*”, “*sistemática*”, and “*sistemática molecular*”, en inglés y español, tanto a nivel individual como combinados mediante los conectores “or” y “and” (*e.g.*, *Dictyota* and taxonomy; *Dictyotales* and phylogeny; *Dictyotaceae* and phylogeny or taxonomy). También se revisaron las referencias en las publicaciones encontradas, en aras de completar la lista de publicaciones relacionadas con el género *Dictyota*.

Excluimos publicaciones como tesis de pregrado y maestría, resúmenes de notas de congresos y divulgación, y estudios no relacionados con aspectos sistemáticos (*e.g.*, fisiología, química y ecología), así como publicaciones sin menciones de los taxones de *Dictyota*. Se incluyeron en el análisis las tesis de doctorado, los artículos científicos, las guías de campo, las monografías y los estudios florísticos publicados a nivel mundial. Para manejar y analizar mejor los estudios seleccionados, se categorizaron las fuentes por tipo de taxonomía: la taxonomía alfa, que consiste en la caracterización y denominación de especies y se destaca por

(by categories), authorities (by taxon), and the number of genera related to the name *Dictyota*. Additionally, an analysis by century (19th, 20th, and 21st) and 20-year periods (vicennium) was performed, which involved calculating the average number of names registered and authorities by period. Additionally, a catalogue of taxonomic names was generated (supplemental material 1), for each of which information such as valid publication, type locality, and synonyms is included; in some cases, a note is provided.

The search for publications concerning the genus *Dictyota* was carried out in 11 databases, covering the period from 1809 to 2024: Academia, Biodiversity Heritage Library (BHL), Cambridge Scientific Abstract (CSA), Google Scholar, Journal Storage (JSTOR), ResearchGate, Scientific Electronic Library Online (SciELO), and Science Direct. The search was supplemented with three additional scientific publishers: Blackwell Sinergy, Springer, and Walter de Gruyter. The descriptors used were “*Dictyota*”, “*Dictyoteae*”, “*Dictyotaceae*”, “*Dictyotales*”, “*Taxonomy*”, “*Phylogeny*”, “*Biogeography*”, “*Phylogeography*”, “*Phylogeographic*”, “*Systematics*”, and “*Molecular systematics*”, in English and Spanish, both individually and combined with the connectors “or, and” (*e.g.*, *Dictyota* and taxonomy; *Dictyotales* and phylogeny; *Dictyotaceae* and phylogeny or taxonomy). The references in the publications found were also reviewed, in order to complete the list of publications related to the genus *Dictyota*.

We excluded publications such as bachelor and master’s theses, the abstracts of congress and divulgation notes, and studies not related to systematic aspects (*e.g.*, physiology, chemistry, and ecology), as well as publications without mention of *Dictyota*’s taxa. Publications such as PhD theses, scientific papers, field guides, monographies, and floristic studies published worldwide were included in the analysis. To better manage and analyze the selected studies, the sources were categorized by type of taxonomy: alpha taxonomy, which consists of characterizing and naming species, standing out for including processes such as the exploration and description of taxa; beta taxonomy, which consists of a synthesis phase, involving extensive and monographic reviews, with many such studies including new species and analyses of the evolutionary relationships between taxa, as well as floristic studies; and gamma taxonomy, which consists of evolutionary studies and phylogenetic analyses at different levels, incorporating different areas such as biogeography, genetics,

incluir procesos como la exploración y descripción de taxones; la taxonomía beta, que consiste en una fase de síntesis e involucra revisiones extensivas y monográficas, donde muchos estudios incluyen nuevas especies y análisis de las relaciones evolutivas entre taxones, además de estudios florísticos; y la taxonomía gamma, que consiste en estudios evolutivos y análisis filogenéticos en diferentes niveles, incorporando diferentes áreas como la biogeografía, la genética y la evolución (Mayr, 2000; Schlick-Steiner *et al.*, 2010; Llorente, 2011; Noriega *et al.*, 2015). La información obtenida de cada publicación fue registrada en una base de datos de hoja de cálculo, incluyendo el tipo de trabajo taxonómico (alfa, beta o gamma), el/los autor(es), el año, el título, la revista, el área de estudio, las coordenadas geográficas (si se mencionaban en la publicación) y el tipo de marcador molecular utilizado (e.g., *rbcl*, *cox1* o *psbA*). Después de capturar toda la información relevante, se realizó un análisis descriptivo para obtener el número de publicaciones por tipo de taxonomía y región geográfica. Si se utilizaron marcadores moleculares, se especificó cuántos y cuáles y el tiempo de uso. Toda esta información se analizó, por siglos (XIX, XX y XXI) y periodos de 20 años (vicenios), en aras de identificar tendencias en los estudios taxonómicos.

RESULTADOS

En la plataforma AlgaeBase (Guiry y Guiry, 2024) se identificaron 318 nombres infragenéricos en el género *Dictyota* (ver material suplementario 1), de los cuales 226 pertenecían a la categoría de especie, 63 a variedad y 29 a forma. Respecto al número de nombres por estatus, 110 pertenecían a la categoría de nombres aceptados (93 especies, 10 variedades y 7 formas), 179 eran sinónimos (117 especies, 45 variedades y 17 formas) y 29 eran ilegítimos (16 especies, 8 variedades y 5 formas). Además, encontramos 100 taxones de otros géneros que eran sinónimos de *Dictyota*. El más común era *Dilophus* K. Agardh, con 38 sinónimos, seguido de *Zonaria* C. Agardh (18) y *Bicrista* Kuntze (12) (ver Figura 1).

and evolution (Mayr, 2000; Schlick-Steiner *et al.*, 2010; Llorente, 2011; Noriega *et al.*, 2015). The information obtained from each publication was recorded in a spreadsheet database, including the type of taxonomic work (alpha, beta, or gamma), author(s), year, title, journal, area of study, geographic coordinates (if stated in the publication), and the type of molecular marker used (e.g., *rbcl*, *cox1*, or *psbA*). After capturing all relevant information, a descriptive analysis was conducted to obtain the number of publications by type of taxonomy and by geographical regions, in the case that molecular markers were used, how many and which; and the time of use, both by century (19th, 20th, and 21st) and 20-year periods (vicennium), in order to identify the trends in the taxonomic studies.

RESULTS

On the Algaebase platform (Guiry and Guiry, 2024), 318 infrageneric names in the genus *Dictyota* were identified (see supplemental material 1), of which 226 belonged to the species category, 63 to variety, and 29 to form. Regarding the number of names by status, 110 belonged to the category of accepted names (93 species, 10 varieties, and 7 forms), 179 were synonyms (117 species, 45 varieties, and 17 forms), and 29 were illegitimate (16 species, 8 varieties, and 5 forms). Additionally, we found 100 taxa from 20 other genera that were synonyms of *Dictyota*; the most common one was *Dilophus* J. Agardh, with 38 synonyms, followed by *Zonaria* C. Agardh (18) and *Bicrista* Kuntze (12); (see Figure 1).

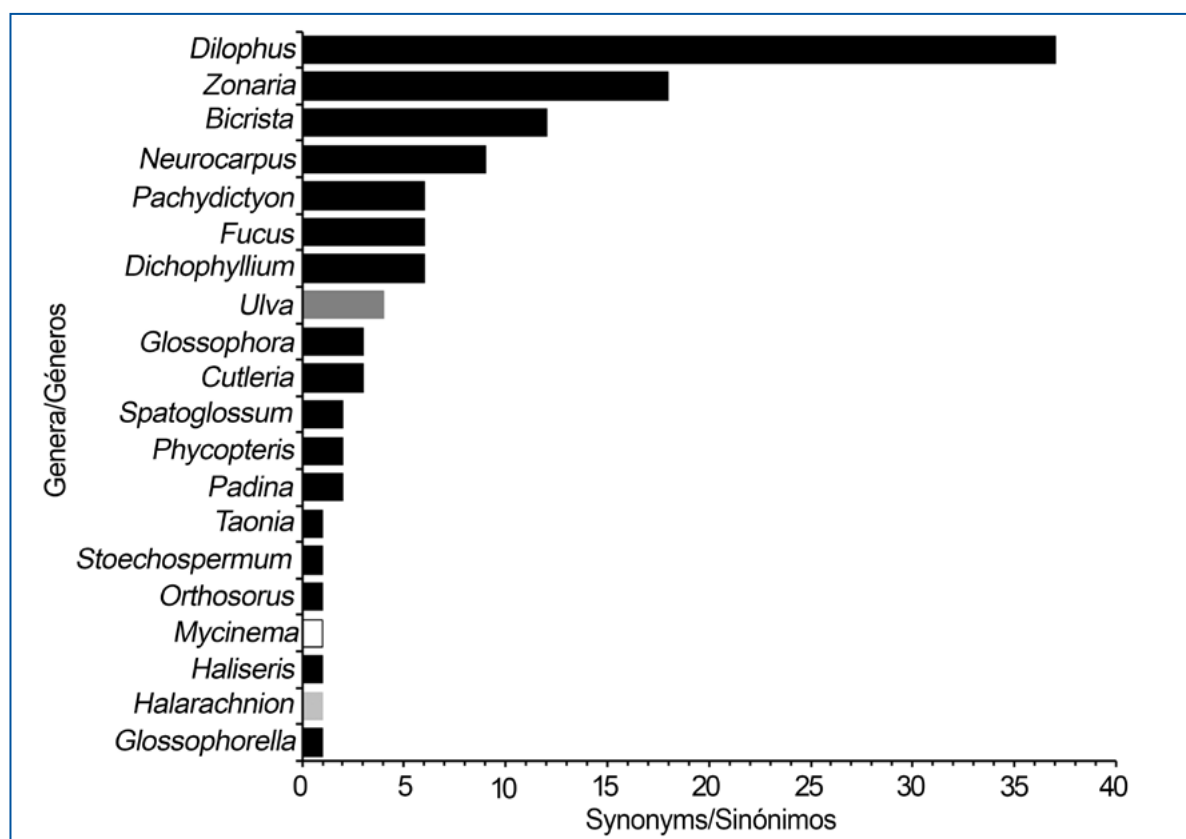


Figura 1. Número de sinónimos de otros géneros bajo nombres actuales de *Dictyota*, ordenados de mayor a menor (Phaeophyceae, negro; Chlorophyta, gris oscuro; Rhodophyta, gris claro; Fungi, blanco).

En cuanto a los 179 nombres de *Dictyota* que presentaban estados de sinonimia, 118 estaban asociados con nombres actualmente aceptados de *Dictyota*. De estos, *D. dichotoma* (Hudson) J. V. Lamouroux y *D. dichotoma* var. *intricata* (C. Agardh) Greville tenían el mayor número de sinónimos, con 23 y 20 respectivamente. Los 61 sinónimos restantes fueron categorizados en otros géneros, siendo *Canistrocarpus cervicornis* (Kützinger) De Paula y De Clerck y *C. crispatus* (J.V. Lamouroux) De Paula y De Clerck los que presentaban el mayor número de sinónimos (ambos con ocho).

La variación temporal en la tasa de descripciones por siglo indicó que en el siglo XIX se crearon 211 nombres, de los cuales solo 54 han perdurado como nombres aceptados. En el siglo XX se crearon 82 nombres, 35 de los cuales son aceptados actualmente. En los primeros 24 años del siglo XXI se crearon 25 nombres, 21 de los cuales son aceptados (Tabla 2). En cambio, respecto al total y el promedio de nombres taxonómicos registrados por vicinio en cada siglo, este estudio encontró que el tercer vicinio del siglo XIX tuvo el mayor número de nombres creados (84), mientras que el primero del siglo XX presenta el número más

Figure 1. The number of synonyms of other genera under current names of *Dictyota*, ordered from largest to smallest values (Phaeophyceae, black; Chlorophyta, dark gray; Rhodophyta, light gray; Fungi, white).

Regarding the 179 names of *Dictyota* with synonym status, 118 were categorized under accepted names of *Dictyota*; of these, *D. dichotoma* (Hudson) J.V. Lamouroux and *D. dichotoma* var. *intricata* (C. Agardh) Greville had the highest number of synonyms, with 23 and 20, respectively. The remaining 61 synonyms were categorized in other genera, where *Canistrocarpus cervicornis* (Kützinger) De Paula and De Clerck and *C. crispatus* (J.V. Lamouroux) De Paula and De Clerck had the highest number of synonyms, both with eight.

The temporal variation in description rate by century indicated that, in the 19th century, 211 names were created, of which only 54 have endured as accepted names. In the 20th century, 82 names were created, 35 of which are currently accepted. In the first 24 years of the 21st century, 25 names were created, 21 of which are accepted (Table 2). In contrast, regarding the total and average number of taxonomic names registered per vicinnium by century, this study found that the third vicinnium of the 19th century had the highest number of names created (84), while the first of the 20th century has the lowest number (6). In the case of the first vicinnium of the 21st century, 22 taxonomic names were created (Table 2).

bajo. En el primer vicenio del siglo XXI se crearon 22 nombres taxonómicos (Tabla 2).

Tabla 2. Número total/promedio anual de nombres taxonómicos registrados por siglo y vicenio. Se incluye el número de nombres por estatus taxonómico, de acuerdo con Guiry y Guiry (2024). A= Actualmente aceptado taxonómicamente; S= Sinónimos; I= Nombres ilegítimos.

Century/Siglo	Vicennium/Vicenio					Total	Status/Estatus taxonómico		
	1	2	3	4	5		A	S	I
19th/XIX	34/1.7	20/1	84/4.2**	28/1.4	45/2.3	211	54	141	16
20th/XX	6/0.3*	26/1.3	9/0.45	12/0.6	29/1.45	82	35	37	10
21st/XXI	22/1.1	3/0.15	—	—	—	25	21	1	3

*Valor mínimo; **Valor máximo

A la fecha, 318 nombres taxonómicos han sido registrados por 106 autoridades. Cinco de ellas han realizado los mayores aportes: F. T. Kützing (53 registrados y ocho aceptados), J. G. Agardh (32 registrados y 11 aceptados), J. V. Lamouroux (32 registrados y ocho aceptados), R. Schnetter (19 registrados y 10 aceptados) e I. Hörnig (18 registrados y 10 aceptados) (ver Figura 2).

Table 2. Total number/annual average of taxonomic names recorded by century and vicennium. The number of names by taxonomic status is included, following Guiry and Guiry (2024). A= Currently accepted; S= Synonyms; I= Illegitimate names.

*Minimum value; **Maximum value

To date, 318 taxonomic names have been recorded by 106 authorities. Five authorities have made the largest contributions: F. T. Kützing (53 registered and 8 accepted), J. G. Agardh (32 registered and 11 accepted), J.V. Lamouroux (32 registered and 8 accepted), R. Schnetter (19 registered and 10 accepted), and I. Hörnig (18 registered and 10 accepted) (see Figure 2).

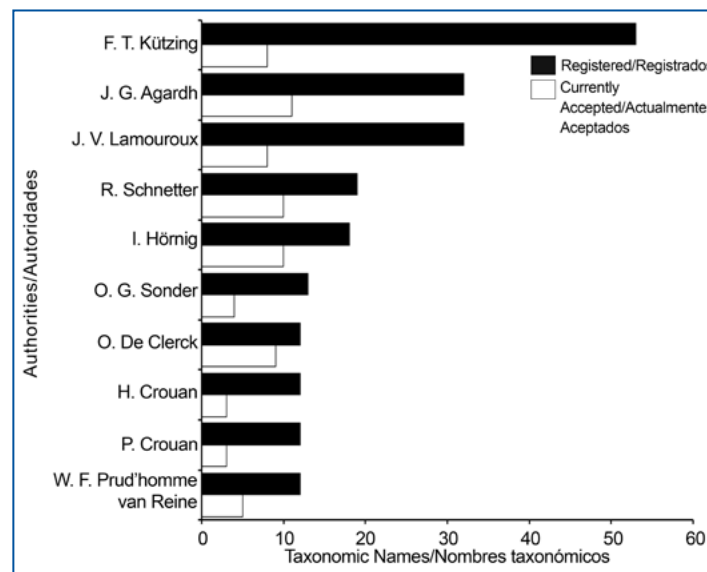


Figura 2. Número de nombres registrados y aceptados por autoridades dentro del género *Dictyota*. Ordenados de mayor a menor número de nombres registrados.

Figure 2. Number of registered and currently accepted names by authorities within the genus *Dictyota*, ordered from least to greatest number of registered names.

Se compiló un total de 514 publicaciones. Sin embargo, después de aplicar los criterios de exclusión, solo quedaron 206 (ver material suplementario 2). La mayoría de ellos abordaban la taxonomía alfa (88), seguida de la beta (74) y la gama (44). Geográficamente, la región con el mayor número de publicaciones fue Europa (61), seguida de Asia (38) y Oceanía (36). Respecto

A total of 514 publications were compiled; however, after applying the exclusion criteria, only 206 remained (see supplemental material 2). Most of them addressed alpha taxonomy (88), followed by beta taxonomy (74) and gamma taxonomy (44). Geographically, the region with the highest number of publications was Europe (61), followed by Asia (38) and Oceania (36). Regarding the type

al tipo de publicaciones taxonómicas, para las taxonomías alfa y gamma, Europa presentó el mayor número de publicaciones. Entretanto, Asia registró el mayor número (18) para la taxonomía beta (Figura 3).

of taxonomic work, for both alpha and gamma taxonomy, Europe had the highest number of publications, while for beta taxonomy, Asia (18) had the highest number of publications (Figure 3).

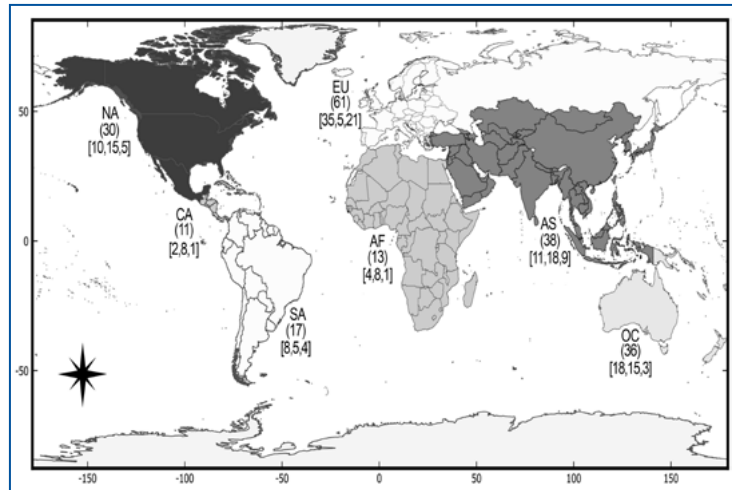


Figura 3. Número de publicaciones por tipo de trabajo taxonómico [alfa, beta, gama] para cada región (paréntesis). Regiones geográficas en escala de grises: África (AF), Asia (AS), Centroamérica (CA), Europa (EU), Norteamérica (NA), Oceanía (OC) y Sudamérica (SA). Realizado en QGIS 3.22.2-Lima utilizando world_map.gpkg, EPSG:4326 - WGS 84.

Figure 3. Number of publications by type of taxonomic work [alpha, beta, gamma] by region (parenthesis). Geographic regions in grayscale: Africa (AF), Asia (AS), Central America (CA), Europe (EU), North America (NA), Oceania (OC), and South America (SA). Prepared in QGIS 3.22.2-Lima using world_map.gpkg, EPSG:4326 - WGS 84. .

El análisis temporal por siglo y vicenios (Figura 4) demostró que las publicaciones de taxonomía alfa se concentran en los siglos XIX y XX (53 y 35 respectivamente). La taxonomía beta surgió en el siglo XX (37 publicaciones) y continúa hasta el día de hoy, con 42 artículos publicados en el primer vicenio del siglo XXI. La taxonomía gamma empezó en el vicenio final del siglo XX (3) y aumentó en el siglo XXI con 41 publicaciones.

Temporal analysis by century and vicennial (Figure 4) demonstrated that alpha taxonomy publications were concentrated in the 19th and 20th centuries (53 and 35, respectively). Beta taxonomy emerged in the 20th century (37 publications) and continues until today, with 42 papers published in the first vicennial of the 21st century. Gamma taxonomy began in the final vicennial of the 20th century (3) and increased in the 21st century with 41 publications.

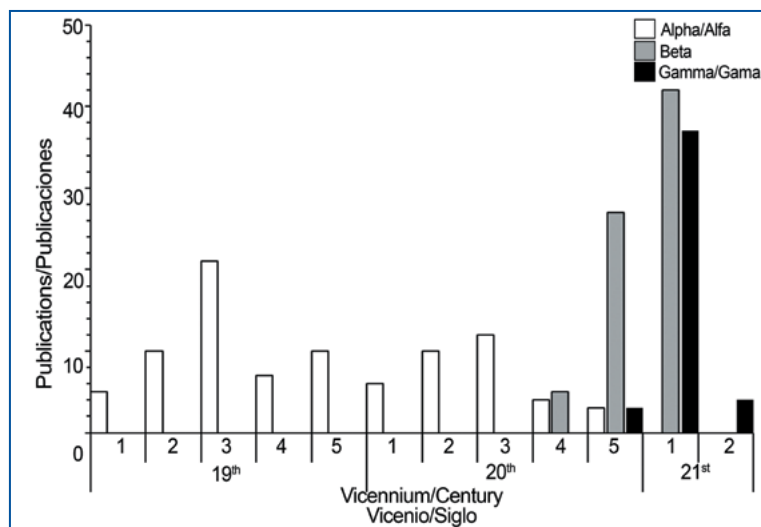


Figura 4. Número de publicaciones sobre el género *Dictyota* por tipo de taxonomía (alfa, beta, gama) y por vicenio-siglo.

Figure 4. Number of publications on the genus *Dictyota* by type of taxonomy addressed (alpha, beta, gamma) and vicennial-century.

En cuanto a la taxonomía beta, 22 publicaciones eran revisiones taxonómicas o monografías, y 52 eran estudios florísticos. Entre los estudios florísticos, los taxones con el mayor número de registros fueron *Dictyota friabilis* Setchell (24), *D. dichotoma* (23), *D. ciliolata* Sonder ex Kützinger (21), *D. bartayresiana* J. V. Lamouroux (18), *D. adnata* Zanardini, *D. ceylanica* Kützinger y *D. humifusa* Hörnig, Schnetter & Coopejans (cada uno con 13).

De las 44 publicaciones de taxonomía gama, 41 utilizaron 27 marcadores moleculares para la delimitación de especies, y las tres restantes utilizaron componentes bioquímicos. Los estudios con marcadores moleculares se categorizaron por origen: nuclear (9), plastídico (7) y mitocondrial (11). Un análisis de frecuencia indicó que los marcadores plastídicos fueron los más utilizados (33 publicaciones), mientras que los marcadores nucleares fueron los menos frecuentes (13 publicaciones). Entre los marcadores específicos, LSU rDNA fue el marcador nuclear más común, y *rbcl* y *cox1* fueron los marcadores plastídico y nuclear más frecuentes (Tabla 3).

Tabla 3. Marcadores moleculares (mitocondriales, nucleares, y plastídicos) más frecuentemente usados en las publicaciones de taxonomía gama del género *Dictyota*.

Regarding beta taxonomy, 22 publications were taxonomic reviews or monographs, while 52 were floristic studies. Within the floristic studies, the taxa with the highest number of records were *Dictyota friabilis* Setchell (24), *D. dichotoma* (23), *D. ciliolata* Sonder ex Kützinger (21), *D. bartayresiana* J. V. Lamouroux (18), *D. adnata* Zanardini, *D. ceylanica* Kützinger, and *D. humifusa* Hörnig, Schnetter & Coopejans (each with 13).

Of the 44 gamma taxonomy publications, 41 utilized 27 molecular markers for species delimitation, while the remaining three used biochemical components. The studies with molecular markers were categorized by origin: Nuclear (9), plastid (7), and mitochondrial (11). A frequency analysis indicated that plastid markers were most frequently used (33 publications), while nuclear markers were least frequent (13 publication). Among specific markers, LSU rDNA was the most common nuclear marker, while *rbcl* and *cox1* were the most frequent plastid and mitochondrial markers, respectively (Table 3).

Table 3. The molecular markers (mitochondrial, nuclear, and plastid) most often used in publications on the gamma taxonomy of the genus *Dictyota*.

Type/Tipo	Molecular Markers/ Marcadores Moleculares	Frequency of use/ Frecuencia de uso
Mitochondrial/ Mitocondrial	<i>cox1</i>	16*
	<i>cox3</i>	10
	<i>nad1</i>	8
Nuclear/Nuclear	LSU rDNA	6
	18S rDNA	2
	26S rDNA	2
Plastids/ Plástidos	<i>rbcl</i>	24*
	<i>psbA</i>	21*
	<i>psaA</i>	9

*Marcadores con las frecuencias más altas. *Markers with the highest frequencies.

DISCUSIÓN

Según se determinó en este estudio, el estado del arte sobre *Dictyota* cubre una escala temporal de más de 200 años y, espacialmente, cubre casi todas las regiones tropicales y subtropicales donde se registra este taxón. Reflejando la

DISCUSSION

As determined in this study, the state-of-the-art relating to *Dictyota* covers a temporal scale of over 200 years, while, spatially, it covers almost all tropical and subtropical regions where this taxon occurs. Reflecting the evolution of the knowledge of the

evolución del conocimiento del género, la tendencia actual de los estudios está encaminada hacia la taxonomía gama (Figura 4), aunque aún quedan preguntas por responder y áreas sin abordar, como se describe en otras revisiones sobre macroalgas (e.g., Mattio y Payri, 2011; Yang *et al.*, 2017).

Los desafíos relacionados con la interpretación de las variaciones morfológicas del género *Dictyota* se hacen evidentes en el alto porcentaje de nombres sinonimizados [(57 %) (Figura 1, Tabla 1)]. En los estudios sobre algas, alrededor del 50 % de los nombres taxonómicos son sinónimos, lo que refleja cambios taxonómicos y nomenclaturales dinámicos (De Clerck *et al.*, 2013), como se observa en *Dictyota*. Estos cambios se relacionan con las etapas tempranas de clasificación dentro del sistema de Linneo, que reconocía tres géneros de algas definidos por su forma: *Conferva* Linnaeus (talos filamentosos), *Fucus* (talos cartilaginosos) y *Ulva* (talos membranosos). En este sentido, criterios como el color del talo y las características reproductivas y anatómicas fueron incorporados para definir nuevos géneros, incluyendo *Zonaria* (Agardh, 1817), *Dilophus*, *Glossophora*, *Pachydictyon* (Agardh, 1882, 1894), *Bicrista* (Kuntze, 1898), y *Glossophorella* (Nizamuddin y Campbell, 1995). Ahora, estos géneros son reconocidos dentro de *Dictyota*, *Canistrocarpus* y *Rugulopterix* (De Clerck *et al.*, 2006). Más allá de los límites del género, la delimitación de especies continúa siendo difícil debido a la falta de revisiones taxonómicas integrales. Según comentó Dayrat (2005), los taxonomistas pueden pasar por alto los nombres de especies existentes cuando proponen nuevos, lo que contribuye a una sobreabundancia de sinónimos o nombres dudosos. Aún con análisis de ADN, este problema sigue siendo un desafío sin resolver, principalmente por la necesidad de datos adicionales.

Nuestro análisis reveló que el 36 % de las especies de *Dictyota* eran sinónimos de *D. dichotoma* y *D. dichotoma* var. *intricata*. Este hallazgo se alinea con las observaciones de Ni-Ni-Win *et al.* (2024), quienes afirmaron que, debido a la falta de características morfológicas distinticas, los especímenes de *Dictyota* suelen ser identificados como *dichotoma* en estudios que no se centran en la taxonomía y que con frecuencia no realizan un examen minucioso. Por otro lado, De Clerck (2003) resaltó que la extensiva variabilidad morfológica dentro del complejo *D. dichotoma* ha resultado en descripciones de varias especies y combinaciones nuevas, muchas de ellas basadas en diferencias morfológicas menores o formas de crecimiento aberrantes. Por

genus, the current trend in taxonomic studies is towards gamma taxonomy (Figure 4), although questions remain unanswered and areas unaddressed, as described in other reviews about macroalgae (e.g., Mattio and Payri, 2011; Yang *et al.*, 2017).

The challenges relating to interpreting the morphological variations in the genus *Dictyota* are evident in the high percentage of synonymized names [57% (Figure 1, Table 1)]. In algal studies, about 50% of the taxonomic names are synonyms, reflecting dynamic taxonomic and nomenclatural changes (De Clerck *et al.*, 2013), as seen in *Dictyota*. These shifts are related to early stages of classification within the Linnean system, which recognized three genera of algae defined by their form: *Conferva* Linnaeus (filament thalli), *Fucus* (cartilaginous thalli), and *Ulva* (membranous thalli). Subsequently, criteria such as thallus color, reproductive and anatomical characteristics were incorporated to define new genera, including *Zonaria* (Agardh, 1817), *Dilophus*, *Glossophora*, *Pachydictyon* (Agardh, 1882, 1894), *Bicrista* (Kuntze, 1898), and *Glossophorella* (Nizamuddin and Campbell, 1995). These genera are now recognized within *Dictyota*, *Canistrocarpus*, and *Rugulopterix* (De Clerck *et al.*, 2006). Beyond genus boundaries, species delimitation remains difficult due to a lack of comprehensive taxonomic revisions. As Dayrat (2005) has noted, taxonomists may inadvertently overlook existing species names when proposing new ones, contributing to an overabundance of synonyms or dubious names. Even with DNA analyses, this problem persists as an unresolved challenge, mainly because further data are still needed.

Our analysis revealed that 36% of *Dictyota* species names were synonyms of *D. dichotoma* and *D. dichotoma* var. *intricata*. This finding aligns with observations by Ni-Ni-Win *et al.* (2024), who noted that *Dictyota* specimens, due to a lack of distinctive morphological features, are frequently identified as “*dichotoma*” in studies not focused on taxonomy, often without thorough examination. Conversely, De Clerck (2003) highlighted that the extensive morphological variability within the *D. dichotoma* complex has resulted in the description of several new species and combinations, many based on minor morphological differences or aberrant growth forms; for example, the variety “*intricata*” mentioned by Tronholm *et al.* (2010b) is likely a slender growth form of *D. dichotoma*. Consequently, such subtle variations can lead to species misidentification and the unjustified description of new taxa.

We observed an erratic pattern in the temporal variation of the

ejemplo, la variedad (*intricata*) mencionada por Tronholm *et al.* (2010b) bien podría ser una forma delgada de crecimiento de *D. dichotoma*. En consecuencia, variaciones tan sutiles pueden llevar a una mala identificación de especies y a la descripción injustificada de nuevos taxones.

Observamos un patrón errático en la variación temporal de la tasa de descripciones de especies de *Dictyota* (Tabla 2). El mayor número de descripciones se registró en el siglo XIX, coincidiendo con las expediciones más grandes, como es el caso de Lamouroux (1809a, 1809b), Greville (1830), Agardh (1841) y Kützinger (1849). Entretanto, el número disminuyó en el siglo XX (Tabla 2), lo que puede estar vinculado a eventos globales como las Guerras Mundiales (durante el primer y tercer vicinio), las cuales afectaron el progreso científico en muchos campos (South y Whittick, 1996; De Clerck *et al.*, 2013). No obstante, a finales del siglo XX y principios del XXI se dio un resurgir de las tasas de descripción, probablemente impulsado por los avances tecnológicos y la adopción de nuevas técnicas, en particular los análisis moleculares (e.g., De Clerck *et al.*, 2006; Tronholm *et al.*, 2010b; Lozano-Orozco *et al.*, 2015).

Además, los códigos nomenclaturales vigentes, como el Código Internacional de Nomenclatura de algas, hongos y plantas, fueron fortalecidos para estabilizar los nombres taxonómicos, previniendo la confusión y garantizando la permanencia de los nombres publicados de manera válida y taxonómicamente aceptados (Dayrat, 2005; Pedroche, 2018; Turland *et al.*, 2018). Por otro lado, los nombres inválidos —como *Dictyota harveyana* Sonder nom. nud.— carecen de descripciones (Art. 38 del Código de nomenclatura), y no hay especímenes depositados en el herbario Sonder (Art. 38 del Código de nomenclatura) (De Clerck, 2003). Además, algunos nombres continúan sin resolver, como es el caso de *Dictyota flabellulata* M.S. Foster & Schiel, listado como nombre preliminar en AlgaeBase (Guiry y Guiry, 2024). Foster y Schiel (1985; p. 29, 30) no describieron una nueva especie; simplemente notaron su presencia en una comunidad de bosque de algas. Esto hace de *D. flabellulata* un nom. nud. según el código o un error de citación, como lo sugiere Silva en el *Index nominum algarum*. Es lógico asumir que los autores querían referirse a *D. flabellata*, una especie común de California. Por tanto, *D. flabellulata* debe considerarse como un error tipográfico.

Contados científicos han hecho contribuciones profundas a la taxonomía de *Dictyota*. De las cinco autoridades con el mayor

Dictyota species descriptions rate (Table 2). The highest number of descriptions occurred in the 19th century, coinciding with the greater expeditions, such as those of Lamouroux (1809a, 1809b), Greville (1830), Agardh (1841), and Kützinger (1849). Meanwhile, the number declined in 20th century (Table 2), potentially linked to global events such as World Wars (over the first and third vicennium), which affected scientific progress in many fields (South and Whittick, 1996; De Clerck *et al.*, 2013). However, the late 20th century and early 21st century saw a resurgence in description rates, likely driven by technological advancements and the adoption of new techniques, particularly molecular analyses (e.g. De Clerck *et al.*, 2006; Tronholm *et al.*, 2010b; Lozano-Orozco *et al.*, 2015).

Additionally, currently used nomenclatural codes, such as the *International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants*, were strengthened to stabilize taxonomic names, preventing confusion and ensuring permanence for validly published and taxonomically accepted names (Dayrat, 2005; Pedroche, 2018; Turland *et al.*, 2018). Conversely, invalid names—such as *Dictyota harveyana* Sonder nom. nud.— lack description (Art. 38 of the *Nomenclature Code*) and there are not specimens deposited in the Herbarium Sonder (Art. 38 Nomenclature Code) (De Clerck, 2003). Furthermore, some names remain unresolved, as is the case for *Dictyota flabellulata* M.S. Foster & Schiel, listed as a preliminary name in AlgaeBase (Guiry and Guiry, 2024). Foster and Schiel (1985; p. 29, 30) did not describe a new species but merely noted its presence in a kelp community. This renders *D. flabellulata* a nom. nud. according to the code or a citation error, as suggested by Silva in the *Index Nominum Algarum*. It is logical to assume that the authors intended to refer to *D. flabellata*, a common species of California. Hence *D. flabellulata* should be considered a typographical error.

Profound contributions to the taxonomy of *Dictyota* have been made by a select few scientists. Of the five authorities with the most species names, three date from the 19th century (F. T. Kützinger, J. G. Agardh and J.V. Lamouroux), while the remaining two date from the late 20th century (R. Schnetter and I. Hörnig). This aligns with the observation of De Clerck *et al.* (2013) that a few highly productive individuals drive significant taxonomic output. In *Dictyota*, these three 19th-century authorities described a total of 117 names, with F. T. Kützinger and J. G. Agardh being recognized among major algal taxonomists (South and Whittick, 1996; De Clerck *et al.*, 2013).

número de nombres de especies, tres datan del siglo XIX (F. T. Kützing, J. G. Agardh y J. V. Lamouroux), mientras que los dos restantes datan de finales del siglo XX (R. Schnetter e I. Hörnig). Esto se alinea con la observación de [De Clerck et al. \(2013\)](#): unos pocos individuos altamente productivos suministran un insumo taxonómico significativo. En *Dictyota*, estas tres autoridades del siglo XIX describieron un total de 117 nombres, siendo F. T. Kützing y J. G. Agardh reconocidos entre los más grandes taxonomistas de algas ([South y Whittick, 1996](#); [De Clerck et al., 2013](#)).

El análisis aquí presentado de los estudios taxonómicos sobre *Dictyota* revelaron dos tendencias claras ([Figura 4](#)). En primer lugar, hubo un declive en los estudios de taxonomía alfa, llegando a cero en el siglo XX. En segundo lugar, los estudios de taxonomía beta y gama aumentaron, impulsados por la adopción de una diversidad de métodos analíticos. La taxonomía —la ciencia de caracterizar, clasificar y nombrar taxones ([Schlick-Steiner et al., 2010](#))— es esencial para la investigación en biodiversidad, y sirve como base para la biogeografía, la ecología y los estudios evolutivos ([Noriega et al., 2015](#)). Las especies, en virtud de unidades básicas en estos campos, requieren una denominación adecuada para vincular los organismos al conocimiento existente ([Schlick-Steiner et al., 2010](#)). En este estudio se evalúa la taxonomía alfa, beta y gama para rastrear la evolución del entendimiento taxonómico de *Dictyota*. Siguiendo a [Schlick-Steiner et al. \(2010\)](#) y [Noriega et al. \(2015\)](#), las reconocemos como aproximaciones metodológicas y conceptuales de complejidad creciente, donde la taxonomía beta y gama construyen sobre —y no reemplazan— la taxonomía alfa. Los estudios taxonómicos modernos integran técnicas morfológicas, ecológicas y moleculares para abordar preguntas complejas. Entre los ejemplos están los estudios de [Leliaert y Coppejans \(2007; Siphonocladales, Chlorophyta\)](#), [Selivanova et al. \(2007; Laminariales, Phaeophyceae\)](#) y [Koh y Kim \(2018; Herposiphonia Nägeli, Rhodophyta\)](#), todos los cuales incorporan la taxonomía alfa ([Schlick-Steiner et al., 2010](#)). Sin embargo, según advierte [Giribet \(2015\)](#), si bien los códigos de barras de ADN han impulsado significativamente la investigación en muchos taxones, estos tienen ciertas limitaciones. Por lo tanto, sigue siendo crucial mantener la integración de información morfológica y molecular a nivel de organismo.

Las publicaciones de taxonomía beta representaron el 59 %

Our analysis of *Dictyota* taxonomic studies revealed two distinct trends ([Figure 4](#)): first, there was a decline in alpha taxonomy studies, reaching none in the 21st century; The second, beta and gamma taxonomy studies increased, driven by the adoption of diverse analytical methods. Taxonomy—the science of characterizing, classifying and naming taxa ([Schlick-Steiner et al., 2010](#))—is fundamental to biodiversity research, serving as the basis for biogeography, ecology, and evolutionary studies ([Noriega et al., 2015](#)). Species, as the basic units of these fields, require accurate naming to link organisms to existing knowledge ([Schlick-Steiner et al. 2010](#)). In this study, we assessed alpha, beta, and gamma taxonomy to trace the evolution of taxonomic understanding in *Dictyota*. Following [Schlick-Steiner et al. \(2010\)](#) and [Noriega et al. \(2015\)](#), we recognize these as methodological and conceptual approaches of increasing complexity, where beta and gamma taxonomy build upon, rather than replace, alpha taxonomy. Modern taxonomic studies integrate morphological, ecological, and molecular techniques to address complex questions. Examples include the studies of [Leliaert and Coppejans \(2007; Siphonocladales, Chlorophyta\)](#), [Selivanova et al. \(2007; Laminariales, Phaeophyceae\)](#), and [Koh and Kim \(2018; Herposiphonia Nägeli, Rhodophyta\)](#), all of which incorporate alpha taxonomy ([Schlick-Steiner et al., 2010](#)). However, as [Giribet \(2015\)](#) cautions while DNA barcoding has significantly advanced research across many taxa, it has certain limitations. Therefore, maintaining the integration of morphological and molecular information at the organismal level remains crucial.

Beta taxonomy publications represented 59% of our total compiled literature, reflecting a synthesis phase characterized by extensive monographic revisions and floristic studies. These studies often include descriptions of new species and analyses of evolutionary relationships ([Mayr, 2000](#); [Llorente, 2011](#); [Noriega et al., 2015](#)). Within this category, we identified 22 taxonomic revisions focused on specific regions, such as Bangladesh, the Indian Ocean, the Mediterranean Sea, and Venezuela ([Hörnig and Schnetter, 1988](#); [De Clerck, 2003](#); [Solé and Foldvik, 2003](#); [Islam et al., 2020](#)), as well as 52 floristic studies (70% of the total for beta taxonomy) from diverse geographic regions, including the Philippines, Sultanate of Oman, and the Gulf of California ([Silva et al., 1987](#); [Wynne and Jupp, 1998](#); [Norris, 2010](#)) ([Figure 3](#)). Our finding suggests that comprehensive reviews and monographic approaches, exemplified by those of [De Clerck \(2003\)](#) and [Theophilus et al. \(2020\)](#), are still needed in regions

de nuestro total de literatura compilada, reflejando una fase de síntesis caracterizada por revisiones monográficas y estudios florísticos extensivos. Estos estudios suelen incluir descripciones de nuevas especies y análisis de relaciones evolutivas (Mayr, 2000; Llorente, 2011; Noriega *et al.*, 2015). Dentro de esta categoría, se identificaron 22 revisiones taxonómicas centradas en regiones específicas como Bangladesh, el océano Índico, el mar Mediterráneo y Venezuela (Hörnig y Schnetter, 1988; De Clerck, 2003; Solé y Foldats, 2003; Islam *et al.*, 2020), así como 52 estudios florísticos (70 % del total para la taxonomía beta) de una diversidad de regiones geográficas, incluyendo las Filipinas, el Sultanato de Omán y el Golfo de California (Silva *et al.*, 1987; Wynne y Jupp, 1998; Norris, 2010) (Figura 3). Esos hallazgos sugieren que, en regiones como África y Centro y Sudamérica, aún se necesitan revisiones integrales y enfoques monográficos, ejemplificados por De Clerck (2003) y Theophilus *et al.* (2020), a fin de mejorar la comprensión de *Dictyota* (Figura 3).

Se evidenció una tendencia positiva en las publicaciones de taxonomía gamma al principio del siglo XXI (Figura 4). Este aumento puede atribuirse a avances en biología molecular, los cuales han facilitado el uso de métodos moleculares y la interpretación de sus resultados para organismos terrestres y acuáticos en aspectos sistemáticos, biogeográficos y evolutivos (Díaz-Larrea *et al.*, 2016). Tautz *et al.* (2003) resaltaron un desafío clave en la taxonomía basada en secuencias de ADN: proporcionar secuencias para especies con nombres lineanos (binomiales) —un desafío aún vigente en *Dictyota*. Esto es crucial para establecer una línea de base en el conocimiento de la diversidad, particularmente en grupos como las algas, donde prevalecen la diversidad críptica, la simplicidad morfológica, la plasticidad fenotípica y la convergencia evolutiva (Saunders, 2005; Bringloe y Saunders, 2019).

En *Dictyota*, 51 % de los estudios de taxonomía gama se centraron en la descripción de nuevas especies, particularmente en el siglo XXI (*e.g.*, Lozano-Orozco *et al.*, 2015; Nelson *et al.*, 2019; Ni-Ni-Win *et al.*, 2024). Esto se alinea con la observación de Leliaert *et al.* (2014), quienes encontraron que al menos 50 % de los artículos sobre algas publicados entre 2012 y 2013 abordaban la delimitación de especies o la descripción de especies nuevas. Además, la taxonomía gama ha mejorando la comprensión de la sistemática a lo largo de varios niveles taxonómicos —por ejemplo, en niveles superiores (*e.g.*, Draisma *et al.*, 2001; Bittner

such Africa and Central and South America, in order to enhance our understanding of *Dictyota* (Figure 3).

A positive trend in gamma taxonomy publications was evident at the beginning of the 21st century (Figure 4). This increase is attributable to advancements in molecular biology, which have facilitated the use of molecular methods and the interpretations of their results in systematic, biogeographical, and evolutionary aspects of both terrestrial and aquatic organisms (Díaz-Larrea *et al.*, 2016). Tautz *et al.* (2003) highlighted a key challenge in DNA sequence-based taxonomy: providing sequences for species with Linnean (binomial) names —a challenge that persists for *Dictyota*. This is crucial for establishing a baseline of diversity knowledge, particularly in groups such as algae, where cryptic diversity, morphological simplicity, phenotypic plasticity, and evolutionary convergence are prevalent (Saunders, 2005; Bringloe and Saunders, 2019).

In *Dictyota*, 51% of gamma taxonomy studies focused on describing new species, particularly in the 21st century (*e.g.*, Lozano-Orozco *et al.*, 2015; Nelson *et al.*, 2019; Ni-Ni-Win *et al.*, 2024). This aligns with the observation of Leliaert *et al.* (2014), who found that at least 50% of algal papers published between 2012 and 2013 addressed the delimitation of species or description of new species. Furthermore, gamma taxonomy has enhanced our understanding of systematics across various taxonomic levels—for example, at higher levels (*e.g.*, Draisma *et al.*, 2001; Bittner *et al.*, 2008; Silberfield *et al.*, 2011, 2014), the generic level (*e.g.*, Lee and Bae, 2002; De Clerck *et al.*, 2006), and the species level—mainly for the purposes of delimitation (*e.g.*, De Paula *et al.*, 2007; Sadeghi *et al.*, 2019; Delva *et al.*, 2023), detecting cryptic species (*e.g.*, Tronholm *et al.* 2010a; Sun *et al.*, 2012; Vieira *et al.*, 2014), or assessing phylogeographic aspects (*e.g.*, Sissini *et al.*, 2017; Machín-Sánchez *et al.*, 2018). Notably, it has facilitated the recognition of new species within groups where subtle morphological variations such as color, iridescence, proliferations, or reproductive features have been attributed to environmental or distributional factors (*e.g.*, De Clerck *et al.*, 2006; Fernández-García, 2012; Tronholm *et al.*, 2012). However, taxonomic problems persist, and species misinterpretations still occur. For example, Tronholm *et al.* (2012) found significant discrepancies between traditional and DNA-based species concepts for *D. ciliolata* and *D. crenulata*, which were attributed to the morphological complexity of the latter.

et al., 2008; Silberfield *et al.*, 2011, 2014), a nivel genérico (e.g., Lee y Bae, 2002; De Clerck *et al.*, 2006) y a nivel de especie—, principalmente para efectos de delimitación (e.g., De Paula *et al.*, 2007; Sadeghi *et al.*, 2019; Delva *et al.*, 2023), detección de especies crípticas (e.g., Tronholm *et al.*, 2010a; Sun *et al.*, 2012; Vieira *et al.*, 2014) o evaluación de aspectos filogeográficos (e.g., Sissini *et al.*, 2017; Machín-Sánchez *et al.*, 2018). Notablemente, esto ha facilitado el reconocimiento de nuevas especies al interior de los grupos donde variaciones morfológicas sutiles como el color, la iridiscencia, las proliferaciones o las características reproductivas han sido atribuidas a factores ambientales o de distribución (e.g., De Clerck *et al.*, 2006; Fernández-García, 2012; Tronholm *et al.*, 2012). Sin embargo, los problemas taxonómicos persisten, y aún se presentan malinterpretaciones de especies. Por ejemplo, Tronholm *et al.* (2012) encontraron discrepancias significativas entre los conceptos de especie tradicionales y basados en ADN para *D. ciliolata* y *D. crenulata*, las cuales atribuyeron a la complejidad morfológica de esta última.

Entre los marcadores moleculares, los plastídicos fueron inicialmente empleados en estudios de delimitación de especies (Lee y King, 1996), seguidos por los marcadores nucleares (Tautz *et al.*, 2003), que fueron utilizados por última vez en 2012 (Tronholm *et al.*, 2012). Los marcadores *rbcl*, *psbA* y *cox1* (Tabla 4) fueron empleados con más frecuencia en estudios moleculares centrados en *Dictyota*, lo cual es consistente con los hallazgos de Leliaert *et al.* (2014) y Bogaert *et al.* (2020), quienes los identificaron como marcadores de uso común en la delimitación de especies de algas pardas, particularmente en *Dictyota*. En contraste, los estudios sobre *Sargassum* y *Caulerpa* han identificado diferentes marcadores dominantes, como ITS-2, Rubisco parcial, *cox3* y 23S en *Sargassum* y *TufA* en *Caulerpa* (Mattio y Payri, 2011; Zubia *et al.*, 2019). Leliaert *et al.* (2014) anotaron que la delimitación de especies en muchos grupos de algas, especialmente de macroalgas, ha recurrido a marcadores plastídicos y mitocondriales. Esto puede deberse a aspectos técnicos que simplifican la amplificación y la secuenciación de loci organelares. Además, Palumbi *et al.* (2001) sugirieron que una coalescencia más rápida con linajes de especies en genes organelares, en comparación con los nucleares, produce discontinuidades entre la divergencia interespecífica y la variación intraespecífica. Adicionalmente, se ha demostrado que los genes mitocondriales o de cloroplasto se segregan antes durante la especiación que la mayoría de los genes nucleares, revelando

Among molecular markers, plastid markers were initially employed in species delimitation studies (Lee and King, 1996), followed by nuclear markers (Tautz *et al.*, 2003), which were last used in 2012 (Tronholm *et al.*, 2012). The *rbcl*, *psbA*, and *cox1* markers (Table 4) were most frequently used in molecular studies focused on *Dictyota*, consistent with the findings of Leliaert *et al.* (2014) and Bogaert *et al.* (2020), who identified them as commonly used markers for species delimitation in brown algae, particularly in *Dictyota*. In contrast, studies on *Sargassum* and *Caulerpa* have identified different dominant markers, such as ITS-2, partial Rubisco, *cox3*, and 23S in *Sargassum* and *TufA* in *Caulerpa* (Mattio and Payri, 2011; Zubia *et al.*, 2019). Leliaert *et al.* (2014) noted that species delimitation in many algal groups, specially macroalgae, has relied on plastid and mitochondrial markers. This is likely due to technical aspects that simplify the amplification and sequencing of organellar loci. Furthermore, Palumbi *et al.* (2001) suggested that faster coalescence within species lineages in organelle genes, compared to nuclear, produces clearer discontinuities between interspecific divergence and intraspecific variation. Additionally, mitochondrial or chloroplast genes have been shown to segregate earlier during speciation than most nuclear genes, thus revealing earlier stages of speciation.

CONCLUSION

The analysis of nomenclature and taxonomic studies relating to *Dictyota* demonstrated a clear progression in our understanding of the genus. This evolution has led to an integrative approach, fostering more accurate species delimitation and a more refined understanding of the diversity of *Dictyota*. While taxonomic investigation of this genus spans centuries, further efforts towards integrative taxonomy are crucial. Enhanced morphological and anatomical descriptions, coupled with multiple locus analysis or genomic support, are essential for resolving taxonomic ambiguities and clarifying the boundaries defining poorly understood species. These studies are expected to contribute to a more comprehensive understanding of *Dictyota*, enabling the detection of biodiversity loss or the introduction of alien species. Therefore, an integrative taxonomic framework can serve as a support for broader research in terms of phylogeography, ecology, and conservation biology.

ACKNOWLEDGMENTS

KLC express their thanks at the project CB 287189 "Taxonomía

así etapas más tempranas de especiación.

CONCLUSIÓN

El análisis de estudios de nomenclatura y taxonómicos relacionados con *Dictyota* demostró un claro progreso en nuestra comprensión del género. Esta evolución ha llevado a un enfoque integrativo, fomentando una delimitación de especies más precisa y un entendimiento más refinado de la diversidad de *Dictyota*. Si bien la investigación taxonómica de este género abarca siglos, se hacen cruciales los esfuerzos adicionales hacia la taxonomía integrativa. Las descripciones morfológicas y anatómicas mejoradas, en combinación con múltiples análisis de *loci* o apoyo genómico, son esenciales para resolver ambigüedades taxonómicas y aclarar los límites que definen a las especies poco entendidas. Se espera que estos estudios contribuyan a una comprensión más completa de *Dictyota*, permitiendo detectar la pérdida de biodiversidad o la introducción de especies invasoras. Por tanto, un marco taxonómico integrativo puede servir como apoyo para una investigación más amplia en términos de filogeografía, ecología y biología de la conservación.

AGRADECIMIENTOS

KLC expresa su gratitud al proyecto CB 287189, "Taxonomía molecular del género *Pyropia* (Bangiales: Rhodophyta) del Pacífico noroccidental mexicano: especies, distribución y filogenia", financiado por el CONACyT. También agradecemos a los editores de idioma inglés y a los revisores por sus comentarios y sugerencias.

molecular del género *Pyropia* (Bangiales: Rhodophyta) del Pacífico noroccidental mexicano: especies, distribución y filogenia" funded by CONACyT. We also thanks to English language editors and reviewers for their comments and suggestions.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Agardh, C.A. (1817). *Caroli A. Agardh Synopsis algarum Scandinaviae: adjecta dispositione universali algarum*. Lund, Sweden: Ex Officina Berlingiana. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.45465>.
- Agardh, J.G. (1841). In *historiam algarum symbolae*. *Linnaea*, 15(1-50), pp.443–457.
- Agardh, J.G. (1848). *Species, genera et ordines algarum: seu descriptiones succinctae specierum, generum et rodinum, quibus algarum regnum constituitur / auctore Jacobo Georgio Agardh*. Biodiversity Heritage Library (Smithsonian Institution). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.1576>.
- Agardh, J.G. (1872). *Till algernes systematik; nya bidrag*. Biodiversity Heritage Library (Smithsonian Institution). <https://doi.org/10.5962/bhl.title.64414>.
- Beach, K., Walters, L., Borgeas, H., Smith, C., Coyer, J. and Vroom, P. (2003). The impact of *Dictyota* spp. on *Halimeda* populations of Conch Reef, Florida Keys. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 297(2), pp.141–159. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.07.003>.
- Bittner, L., Payri, C., Coouloux, A., Cruaud, C., Dereviers, B. and Rousseaur, F. (2008). Molecular phylogeny of the Dictyotales and their position within the Phaeophyceae, based on nuclear, plastid and mitochondrial DNA sequence data. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 49(1), pp.211–226. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2008.06.018>.
- Bogaert, K.A., Delva, S. and De Clerck, O. (2020). Concise review of the genus *Dictyota* J.V. Lamouroux. *Journal of Applied Phycology*, 32(3), pp.1521–1543. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02121-4>.
- Borenstein, I.A., Hedges, L.V., Higgins, J.P. and Rothstein, H.R. (2009). *Introduction to meta-analysis*. United Kingdom: Wiley, p.544.
- Borlongan, I.A., Terada, R. and Hurtado, A. (2020). Concise review of the genus *Meristotheca* (Rhodophyta: Solieriaceae). *Journal of Applied Phycology*, 33(1), pp.167–181. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02288-w>.
- Bringloe, T.T. and Saunders, G.W. (2019). DNA barcoding of the marine macroalgae from Nome, Alaska (Northern Bering Sea) reveals many trans-Arctic species. *Polar Biology*, 42(5), pp.851–864. <https://doi.org/10.1007/s00300-019-02478-4>.
- Campos De Paula, J., Bueno, L.B., Frugulhetti, I.C.P.P., Yoneshigue-Valentin, Y. and Teixeira, V.L. (2007). *Dictyota dolabellane* sp. nov. (Dictyotaceae, Phaeophyceae) based on morphological and chemical data. *Botanica Marina*, 50(5-6), pp.288–293. <https://doi.org/10.1515/bot.2007.033>.
- Clerck, O.D., Vos, P.D., Gillis, M. and Coppejans, E. (2001). Molecular systematics in the genus *Dictyota* (Dictyotales, Phaeophyta): A first attempt based on restriction patterns of the internal transcribed Spacer 1 of the rDNA (ARDRA-ITS1). *Systematics and Geography of Plants*, 71(1), p.25. <https://doi.org/10.2307/3668750>.
- Cronin, G. and Hay, M.E. (1996a). Susceptibility to herbivores depends on recent history of both the plant and animal. *Ecology*, 77(5), pp.1531–1543. <https://doi.org/10.2307/2265549>.
- Cronin, G. and Hay, M.E. (1996b). Within-plant variation in seaweed palatability and chemical defenses: optimal defense theory versus the growth-differentiation balance hypothesis. *Oecologia*, 105(3), pp.361–368. <https://doi.org/10.1007/bf00328739>.
- Dayrat, B. (2005). Towards integrative taxonomy. *Biological Journal of the Linnean Society*, 85(3), pp.407–415. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2005.00503.x>.
- De Clerck, O., Guiry, M.D., Leliaert, F., Samyn, Y. and Verbruggen, H. (2012). Algal taxonomy: a road to nowhere? *Journal of Phycology*, 49(2), pp.215–225. <https://doi.org/10.1111/jpy.12020>.
- De Clerck, O., Leliaert, F., Verbruggen, H., Lane, C.E., De Paula, J.C., Payo, D.A. and Coppejans, E. (2006). A revised classification of the Dictyotales (Dictyotales, Phaeophyceae) based on *rbcL* and 26S ribosomal DNA sequence analyses. *Journal of Phycology*, 42(6), pp.1271–1288. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2006.00279.x>.
- Delva, S., de la Hoz, C.F., Bafort, Q., D'hondt, S., Shabaka, S., Rashedy, S.H., Sherwood, A.R., Guy-Haim, T., Israel, A. and De Clerck, O. (2023). Tracing the introduction of *Dictyota acutiloba* (Dictyotales, Phaeophyceae) in the Mediterranean Sea, with a reassessment of its geographic distribution. *European Journal of Phycology*, 59(1), pp.38–50. <https://doi.org/10.1080/09670262.2023.2214184>.
- Desfontaines, R.L. (1799). *Flora atlantica sive Historia plantarum quae in atlante, agro tunetano et algeriensi crescant [Tomus secundus]*. [online] France: L.G. Desgranges, pp.161–458. Available at: <https://www.cervantesvirtual.com/obra/flora-atlantica-sive-historia-plantarum-quae-in-atlante-agro-tunetano-et-algeriensi-crescant-tomus-secondus>.
- Díaz-Larrea, J., Pedroche, F.F. y Senties, A. (2016). Impacto de los estudios moleculares en la ficología comparada mexicana: el caso de las macroalgas marinas. *Cymbella*, 2(1), pp.1–15. Available at: <https://cymbella.org>.
- Draisma, S.G.A., van Stam, W.T.R. and Olsen, J.L. (2001). A reassessment of phylogenetic relationships within the Phaeophyceae based on RUBISCO large subunit and ribosomal DNA sequences. *Journal of Phycology*, 37(4), pp.586–603. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2001.037004586.x>.
- Foster, M.S. and Schiel, D.R. (1985). The ecology of giant kelp forests in California: a community profile. California: US Fish and Wildlife Service, p.152.
- García-Fernández, C. (2012). Taxonomía y biogeografía de las familias Caulerpáceae (Chlorophyta), Dictyotáceae (Ochrophyta) y Corallináceae (Rhodophyta) en el Pacífico de Centroamérica. PhD. Thesis. p.253.
- Giribet, G. (2015). Morphology should not be forgotten in the era of genomics—a phylogenetic perspective. *Zoologischer Anzeiger - A Journal of Comparative Zoology*, 256, pp.96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2015.01.003>.
- Greville, R.K. (1830). *Algae britannicae, or descriptions of the marine and other inarticulated plants of the British islands, belonging to the order Algae; with plates illustrative of the*

- genera. Edinburgh: McLachlan & Stewart; Baldwin & Craddock, pp.1–19.
- Guiry, M.D. and Guiry, G.M. (n.d.). Algaebase: Listing the World's Algae. Available at: <http://www.algaebase.org> [Accessed 18 Jul. 2024].
- Hörnig, I. and Schnetter, R. (1988). Notes on *Dictyota dichotoma*, *D. menstrualis*, *D. indica* and *D. pulchella* spec. nova (Phaeophyta). *Phyton*, 28, pp.277–291.
- Hörnig, I., Schnetter, R. and van Reine, W.P.H. (1992). The genus *Dictyota* (Phaeophyceae) in the North Atlantic. I. A new generic concept and new species. *Nova Hedwigia*, 54, pp.45–62. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/204950>.
- Hörnig, I., Schnetter, R. and van Reine, W. (1992). The genus *Dictyota* (Phaeophyceae) in the North Atlantic. II. Key to the species. *Nova Hedwigia*, 54(1-2), pp.397–402. <http://hdl.handle.net/1854/LU-204950>.
- Hudson, W. (1762). *Flora anglica; exhibens plantas per regnum angliae sponte crescentes, distributas secundum systema sexuale: cum differentiis specierum, synonymis auctorum, nominibus incolarum, solo locorum, tempore florendi, officinalibus pharmacopoeorum*. 3rd ed. Algaebase.org, London: Impensis Auctoris, pp. 1–688.
- Index Nominum Algarum (2015). University Herbarium, University of California, Berkeley. [online] Berkeley.edu. Available at: <http://ucjeps.berkeley.edu/CPD/> [Accessed 15 Jan. 2025].
- Islam, M.A., Islam, M.R., Aziz, A. and Liao, L.M. (2020). *Dictyota adnata* Zanardini (Phaeophyceae) - A new record from the Sundarbans mangrove forests, Bangladesh. *Bangladesh Journal of Botany*, 49(2), pp.407–412. <https://doi.org/10.3329/bjb.v49i2.49323>.
- Koh, Y.H. and Kim, M.S. (2018). Taxonomic revision of the genus *Herposiphonia* (Rhodomelaceae, Rhodophyta) from Korea, with the description of three new species. *Algae*, 33(1), pp.69–84. <https://doi.org/10.4490/algae.2018.33.3.10>.
- Kuntze, O. (1898). *Vascularium omnium atque cellularium multarum secundum leges nomenclaturae internationales cum enumeratione plantarum exoticarum in itinere mundi collectarum. - Revisio generum plantarum* Part 1, Leipzig, Germany: A. Felix, p.374. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.327>
- Kützing, F.T. (1843). *Phycologia generalis oder Anatomie, Physiologie und Systemkunde der Tange. Mit 80 farbig gedruckten Tafeln, gezeichnet und gravirt vom Verfasser*. [online] Hathi Trust Digital Library (The HathiTrust Research Center), Leipzig, Germany: F. A. Brockhaus, p. 458. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.4746>.
- Kützing, F.T. (1849). *Species algarum*. Leipzig, Germany: F.A. Brockhaus, p.[i]–vi, [1]–922.
- Kützing, F.T. (1859). *Tabulae Phycologicae; Oder, Abbildungen Der Tange. Nordhausen, Germany: Gedruckt auf kosten des Verfassers (in commission bei W. Köhne)*, pp.i–vii, 1–42.
- Lamouroux, J.V.F. (1809a). Exposition des caractères du genre *Dictyota*, et tableau des espèces qu'il referme. *Journal de Botanique*, 2, pp.38–44.
- Lamouroux, J.V.F. (1809b). Observations sur la physiologie des algues marines, et description de cinq nouveaux genres de cette famille. *Nouveau Bulletin Des Sciences*, Par La Société Philomathique De Paris, 1, pp.330–333.
- Lee, W. and Bae, K. (2002). Phylogenetic relationship among several genera of Dictyotaceae (Dictyotales, Phaeophyceae) based on 18S rRNA and partial rbc L gene sequences. *Marine Biology*, 140(6), pp.1107–1115. <https://doi.org/10.1007/s00227-002-0799-4>.
- Leliaert, F. and Coppejans, E. (2007). Morphological reassessment of the *Boodlea composita*-*Phyllocladion anastomosans* species complex (Siphonocladales: Chlorophyta). *Australian Systematic Botany*, 20(2), pp.161–185. <https://doi.org/10.1071/sb06031>.
- Leliaert, F., Verbruggen, H., Vanormelingen, P., Steen, F., López-Bautista, J.M., Zuccarello, G.C. and Olivier De Clerck (2014). DNA-based species delimitation in algae. *European Journal of Phycology*, 49(2), pp.179–196. <https://doi.org/10.1080/09670262.2014.904524>.
- Llorente, J. (2011). La búsqueda del método natural. México: Fondo de Cultura Económica, p.155.
- Lozano-Orozco, J., Senties, A., De Clerck, O., M. Dreckmann, K. and Díaz-Larrea, J. (2015). Two new species of the genus *Dictyota* (Phaeophyceae: Dictyotales) from the Mexican Caribbean. *American Journal of Plant Sciences*, 6(15), pp. 2492–2501. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.615251>.
- Machín-Sánchez, M., Gil-Rodríguez, M.C. and Haroun, R. (2018). Phylogeography of the red algal *Lau-rencia* complex in the Macaronesia Region and nearby coastal areas: Recent advances and future perspectives. *Diversity*, 10(1), pp.1–21. <https://doi.org/10.3390/d10010010>.
- Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., Giger-Reverdin, S., Lesire, M., Lebas, F. and Ankers, P. (2016). Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 212, pp.1–17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>.
- Mattio, L. and Payri, C.E. (2010). 190 Years of *Sargassum* taxonomy, facing the advent of DNA phylogenies. *The Botanical Review*, 77(1), pp.31–70. <https://doi.org/10.1007/s12229-010-9060-x>.
- Mayr, E. (2000). *The growth of biological thought. Diversity, evolution, and inheritance*. London: Belknap Press, p.974.
- Miller, K.A., Aguilar-Rosas, L.E. and Pedroche, F.F. (2017). A review of non-native seaweeds from California, USA and Baja California, Mexico. *Hidrobiológica*, 21(3), pp.365–379.
- Molina Montoya, N. (2005). ¿Qué es el estado del arte? *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 3(5), pp.73–75. <https://doi.org/10.19052/sv.1666>.
- Nelson, W.A., Sutherland, J.E., Ringham, S. and Murupaenga, H. (2019). *Dictyota korowai* sp. nov. (Dictyotales, Phaeophyceae) from Manawatāwhi/Three Kings Islands, northern New Zealand, previously confused with *Dictyota intermedia*. *Phycologia*, 58(4), pp.433–442. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1625256>.
- Ni-Ni-Win, H.T., Mya-Kyawt-Wai, M., Putri, L.S.E., Geraldino, P.J.L. and Kawai, H. (2024). Two new species of *Dictyota* (Dictyotales, Phaeophyceae), *D. dimorphosa* sp.

- nov. and *D. recumbens* sp. nov., based on morphological and molecular investigations. *Phycologia*, 63(3), pp. 290–302. <https://doi.org/10.1080/00318884.2024.2335606>.
- Nizamuddin, M. and Campbell, A.C. (1995). *Glossophorella* a new genus of the family Dictyotaceae (Dictyotales-Phaeophyta) and its ecology from the coast of the Sultanate of Oman. *Pakistan Botanical Society*, 27, pp.257–262.
- Noriega, J., Santos, A., Aranda, S., Calatayud, J., De Castro, I., Espinoza, V., Hórreo, J., Medina, N., Peláez, M. y Hortal, J. (2015). ¿Cuál es el alcance de la crisis de la taxonomía? Conflictos, retos y estrategias para la construcción de una taxonomía renovada. *Revista IDE@-SEA*, 9, pp.1–16. Available at: http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_09.pdf.
- Norris, J.N. (2010). Marine algae of the northern Gulf of California: Chlorophyta and Phaeophyceae. *Smithsonian Contributions to Botany*, (94), pp.1–276. <https://doi.org/10.5479/si.0081024x.94.276>.
- Pal, A., Kamthania, M.C. and Kumar, A. (2014). Bioactive compounds and properties of seaweeds—A review. *Open Access Library Journal*, 01(04), pp.1–17. <https://doi.org/10.4236/oalib.1100752>.
- Palumbi, S.R., Cipriano, F. and Hare, M.P. (2007). Predicting nuclear gene coalescence from mitochondrial data: the three-times rule. *Evolution*, 55(5), pp.859–868. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00603.x>.
- Patarra, R.F., Iha, C., Pereira, L. and Neto, A.I. (2019). Concise review of the species *Pterocladia capillacea* (S.G. Gmelin) Santelices & Hommersand. *Journal of Applied Phycology*, 32(2), pp.787–808. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-02009-y>.
- Pedroche, F.F. (2018). El código de nomenclatura. Un instrumento de trabajo para los ficólogos. *Cymbella*, 4, pp.69–75. Available at: https://cymbella.fcienas.unam.mx/articulos/V4/02-03/EI_Codigo_de_Nomenclatura.html
- Roth, A.W. (1797). *Catalecta botanica quibus plantae novae et minus cognitae describuntur atque illustrantur*. Fasc. 1. Bibliopolo I.G. Mülleriano, [i]–viii, [1] ed. Leipzig, Germany, p.244.
- Sadegui, M.B., Fakheri, B., Sohrabipour, J., Emamjomeh, A. and Samsampour, D. (2019). Notes on the genus *Dictyota* (Dictyotaceae, Phaeophyceae) in the Persian Gulf, Iran. *The Iranian Journal of Botany*, 25(1), pp.61–71. <https://doi.org/10.22092/ijb.2019.119247>.
- Saunders, G.W. (2005). Applying DNA barcoding to red macroalgae: a preliminary appraisal holds promise for future applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1462), pp.1879–1888. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1719>.
- Schlick-Steiner, B.C., Steiner, F.M., Seifert, B., Stauffer, C., Christian, E. and Crozier, R.H. (2010). Integrative taxonomy: A multisource approach to exploring biodiversity. *Annual Review of Entomology*, 55(1), pp.421–438. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085432>.
- Selivanova, O.N., Zhigadlova, G.G. and Hansen, G.I. (2007). Revision of the systematics of algae in the order Laminariales (Phaeophyta) from the Far-Eastern Seas of Russia on the basis of molecular-phylogenetic data. *Russian Journal of Marine Biology*, 33(5), pp.278–289. <https://doi.org/10.1134/s1063074007050021>.
- Silberfeld, T., Racault, M.-F.L.P., Fletcher, R.L., Couloux, A., Rousseau, F. and De Reviers, B. (2011). Systematics and evolutionary history of pyrenoid-bearing taxa in brown algae (Phaeophyceae). *European Journal of Phycology*, 46(4), pp.361–377. <https://doi.org/10.1080/09670262.2011.628698>.
- Silberfeld, T., Rousseau, F. and Reviers, B. de (2014). An Updated Classification of Brown Algae (Ochrophyta, Phaeophyceae). *Cryptogamie, Algologie*, 35(2), pp.117–156. <https://doi.org/10.7872/crya.v35.iss2.2014.117>.
- Silva, P.C., Menez, E.G. and Moe, R.L. (1987). Catalog of the benthic marine algae of the Philippines. *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences*, 27, pp. 1–179. <https://doi.org/10.5479/si.1943667x.27.1>.
- Sissini, M.N., Barreto, M.B.B.B., Széchy, M.T.M., de Lucena, M.B., Oliveira, M.C., Gower, J., Liu, G., Bastos, E.O., Milstein, D., Gusmão, F., Martinelli-Filho, J.E., Alves-Lima, C., Colepicolo, P., Ameka, G., de Graft-Johnson, K., Gouvea, L., Torrano-Silva, B., Nauwer, F., de Castro Nunes, J.M. and Barufi, J.B. (2017). The floating *Sargassum* (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean – likely scenarios. *Phycologia*, 56(3), pp.321–328. <https://doi.org/10.2216/16-92.1>.
- Solé, M.A. y Foldats, E. (2025). El género *Dictyota* (Phaeophyceae, Dictyotales) en el Caribe venezolano. *Acta Botánica Venezuelica*, 26(1), pp. 41–82.
- Sosa, P.A. and Lindstrom, S.C. (1999). Isozymes in macroalgae (seaweeds): genetic differentiation, genetic variability and applications in systematics. *European Journal of Phycology*, 34(5), pp.427–442. <https://doi.org/10.1017/s0967026299002437>.
- South, G.R. and Whittick, A. (1996). *Introduction to phycology*. Victoria, Australia: Blackwell, p.352.
- Sun, Z., Hanyuda, T., Lim, P.-E., Tanaka, J., Gurgel, C.F.D. and Kawai, H. (2012). Taxonomic revision of the genus *Lobophora* (Dictyotales, Phaeophyceae) based on morphological evidence and analyses rbcL and cox3 gene sequences. *Phycologia*, 51(5), pp.500–512. <https://doi.org/10.2216/11-85.1>.
- Tautz, D., Arctander, P., Minelli, A., Thomas, R.H. and Vogler, A.P. (2003). A plea for DNA taxonomy. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(2), pp.70–74. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(02)00041-1).
- Theophilus, T., Vieira, C., Géraud Culioli, Thomas, O.P., De, A., Serge Andréfouët, Mattio, L., Payri, C.E. and Zubia, M. (2020). Dictyotaceae (Dictyotales, Phaeophyceae) species from French Polynesia: current knowledge and future research. *Advances in botanical research*, pp.163–211. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2019.12.001>.
- Tronholm, A., Leliaert, F., Sansón, M., Afonso-Carrillo, J., Tyberghein, L., Verbruggen, H. and De Clerck, O. (2012). Contrasting Geographical Distributions as a Result of Thermal Tolerance and Long-Distance Dispersal in Two Allegedly Widespread Tropical Brown Algae. *PLoS ONE*, 7(1), p.e30813. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030813>.
- Tronholm, A., Sansón, M., Afonso-Carrillo, J., Verbruggen, H. and De Clerck, O. (2010a). Niche partitioning and the co-

- existence of two cryptic *Dictyota* (Dictyotales, Phaeophyceae) species from the Canary Islands. *Journal of Phycology*, 46(6), pp. 1075–1087. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00912.x>.
- Tronholm, A., Steen, F., Tyberghein, L., Leliaert, F., Verbruggen, H., Antonia Ribera Siguán, M. and De Clerck, O. (2010b). Species delimitation, taxonomy, and biogeography of *Dictyota* in Europe (Dictyotales, Phaeophyceae). *Journal of Phycology*, 46(6), pp.1301–1321. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00908.x>.
- Turland, N., Wiersema, J., Barrie, F., Greuter, W., Hawksworth, D., Herendeen, P., Knapp, S., Kusber, W.-H., Li, D.-Z., Marhold, K., May, T., McNeill, J., Monro, A., Prado, J., Price, M. and Smith, G. eds., (2018). *International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants*. (Shenzhen Code) adopted by the 19th Internat. Bot. Congr. Shenzhen, China, July 2017. Regnum Vegetabile 159 ed. Regnum Vegetabile. Glashütten, Germany: Koeltz Botanical Books. <https://doi.org/10.12705/code.2018>.
- Ulbricht, C., Basch, E., Boon, H., Conquer, J., Costa, D., Culwell, S., Dao, J., Eisenstein, C., Foppa, I.M., Hashmi, S., Isaac, R., Johnstone, K., Kerbel, B.N., LeBlanc, Y.C., Mintzer, M., Shkayeva, M., Smith, M., Sollars, D. and Woods, J. (2013). Seaweed, Kelp, bladderwrack (*Fucus vesiculosus*): An evidence-based systematic review by the natural standard research collaboration. *Alternative and Complementary Therapies*, 19(4), pp. 217– 230. <https://doi.org/10.1089/act.2013.19401>.
- Vieira, C., D'hondt, S., De Clerck, O. and Payri, C.E. (2014). Toward an inordinate fondness for stars, beetles and *Lobophora*? Species diversity of the genus *Lobophora* (Dictyotales, Phaeophyceae) in New Caledonia. *Journal of Phycology*, 50(6), pp.1101–1119. <https://doi.org/10.1111/jpy.12243>.
- Williams, S.L. and Smith, J.E. (2007). A global review of the distribution, taxonomy, and impacts of introduced seaweeds. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38(1), pp.327–359. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095543>.
- Wynne, M.J. and Jupp, B.P. (1998). The benthic marine algal flora of the Sultanate of Oman: New records. *Botanica Marina*, 41(1-6). <https://doi.org/10.1515/botm.1998.41.1-6.7>.
- Zubia, M., Draisma, S.G.A., Morrissey, K.L., Varela-Álvarez, E. and De Clerck, O. (2019). Concise review of the genus *Caulerpa* J.V. Lamouroux.



ARTÍCULO / ARTICLE

Identificación molecular de la microbiota intestinal cultivable de *Epinephelus morio* (mero rojo) y su potencial probiótico

Molecular identification of culturable gut microbiota of *Epinephelus morio* (red grouper) and its probiotic potential

Grecia Montalvo-Fernández ¹

0000-0002-0627-3347

grecia.montalvo@enesmerida.unam.mx

Joanna M. Ortiz-Alcantara ¹

0000-0003-2894-3652

joanna.ortiz@ciencias.unam.mx

Claudia Durruty-Lagunes ²

0000-0002-1112-5939

cvdl@ciencias.unam.mx

María Leticia Arena-Ortiz ^{*}

0000000213348087

leticia.arena@ciencias.unam.mx

1. Laboratorio de Estudios Ecogenómicos. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Carretera Sierra Papacal - Chuburna Puerto. Km. 5.5 Tablaje 31257. Sierra Papacal, 97302 Mérida, Yucatán, México

2. Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) Sisal, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Puerto de Abrigo S/N, 97355 Sisal, Yucatán, México.

* Autor de correspondencia/Corresponding Author: leticia.arena@ciencias.unam.mx

Recibido / Received: 24/07/2024

Aceptado / Accepted: 04/04/2025

Citación / Citation: Montalvo-Fernández, G.; Ortiz-Alcantara, J.; Durruty-Lagunes, C.; Arena, M.L. 2025. Molecular identification of culturable gut microbiota of *Epinephelus morio* (Red grouper) and its probiotic potential. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 32-52

RESUMEN

La microbiota intestinal de *Epinephelus morio* (mero rojo) es importante para la digestión, metabolismo y salud, sin embargo, ha sido poco estudiada. En este estudio, la microbiota intestinal cultivable del mero rojo se caracterizó mediante la secuenciación del gen ARNr 16S y se estudió su potencial probiótico. Se utilizaron seis peces adultos entre 3-7 kg y se tomó el contenido intestinal. La identificación molecular de la microbiota intestinal de *E. morio* se realizó basados en secuenciación de ARNr 16S y posterior análisis usando las bases de datos RNaCentral, SILVA y GenBank (BLASTN). Se determinó la actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica de los aislados empleando medios de cultivo específicos. Se obtuvieron 22 aislados, y los phyla que se identificaron fueron Proteobacteria, Firmicutes y Actinobacteria. La especie aislada con más frecuencia fue *Photobacterium damsela*. Dos aislados presentaron actividad amilolítica y 13 aislados tuvieron actividad proteolítica; ninguno fue positivo para la actividad quitinolítica. *Bacillus infantis*, *Enterococcus faecium* y *Shewanella* sp. se seleccionaron como posibles probióticos para incluirlos en la alimentación de meros en cautiverio, debido a su actividad amilolítica y proteolítica.

Palabras clave: bacteria, microbiota intestinal cultivable, peces marinos, potencial probiótico de mero rojo, secuenciación genética 16S rRNA.

ABSTRACT

The gut microbiota of *Epinephelus morio* or red grouper might be important for digestion, metabolism and health, however, it has been studied little. In this paper, the culturable gut microbiota of wild red grouper in captivity was identified through 16S rRNA gene sequencing, and its potential as probiotic was studied. Six adult fish between 3-7 kg were used for intestinal content sampling. The molecular identification of gut microbiota was performed based on rRNA16S sequencing and analysis using the RNaCentral, SILVA and GenBank databases (BLASTN). Amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity of isolates was determined using specific culture media. 22 isolates were obtained, and bacteria of the phyla Proteobacteria, Firmicutes and Actinobacteria were identified. The most frequently isolated species was *Photobacterium damsela*. Two isolates had amylolytic activity and 13 isolates had proteolytic activity; none were positive for chitinolytic activity. *Bacillus infantis*, *Enterococcus faecium* and *Shewanella* sp. were selected as possible probiotics to include them, in the first instance, in the feeding of captive groupers due to their amylolytic and proteolytic activity.

Key words: bacteria, culturable gut microbiota, marine fish, red grouper probiotic potential, 16S rRNA gene sequencing

INTRODUCCIÓN

La microbiota intestinal puede contener bacterias, hongos, levaduras, protozoos y virus. Sin embargo, las bacterias son las más abundantes, por lo que la microbiota suele referirse principalmente a las bacterias (Serra *et al.*, 2019). Las bacterias son microorganismos con una gran capacidad de adaptación a distintos ecosistemas. Pueden vivir en condiciones realmente extremas de temperatura, salinidad y presión, incluso pueden vivir dentro de otros organismos terrestres y acuáticos. En los organismos acuáticos, como los peces, la microbiota está asociada a la piel, las branquias y el tracto gastrointestinal, donde diferentes especies viven de forma estable e interactúan entre sí, autorregulando su concentración numérica (Merrifield y Rodiles, 2015).

La composición de la comunidad microbiana del intestino de los peces teleósteos está formada inicialmente por bacterias aerobias, facultativas, anaerobias y anaerobias obligadas (Llewellyn *et al.*, 2014). La colonización posterior dependerá de varios factores, como la fase de desarrollo del hospedador, la absorción de nutrientes, el estado fisiológico del pez, las condiciones ambientales, la dieta y otros (Ghanbari *et al.*, 2015).

Algunas especies bacterianas de la microbiota de los peces pueden ser beneficiosas para el hospedador, desempeñando un papel en la modulación del sistema inmunitario y en la producción de compuestos antagonistas frente a patógenos, influyendo en la vulnerabilidad del hospedador frente a determinadas enfermedades (Dridner *et al.*, 2016; López *et al.*, 2020). Pueden influir en la producción de enzimas digestivas, como proteasas, amilasas, quitinasas y lipasas que ayudan a solubilizar los elementos de la dieta. También pueden proporcionar al hospedador enzimas para digerir compuestos de la dieta que el hospedador por sí mismo no puede aprovechar (Butt y Volkoff, 2019), influyendo así en el crecimiento y desarrollo del pez (Kersarcodi-Watson *et al.*, 2007). Influyen en la expresión de genes del sistema inmunitario y de otros genes relacionados con el estrés en el huésped y ayudan a mejorar la actividad de las enzimas antioxidantes (Buruiana *et al.*, 2014). Por ello, algunas bacterias se consideran probióticos, como *Bacillus* sp.

Para identificar los componentes de la microbiota intestinal, existen métodos tradicionales de microbiología y métodos que utilizan la biología molecular. En la microbiología tradicional, se

INTRODUCTION

The intestinal microbiota can contain bacteria, fungi, yeasts, protozoans and viruses. However, bacteria are the most abundant, which is why microbiota usually refers primarily to bacteria (Serra *et al.*, 2019). Bacteria are microorganisms with an extensive capacity to adapt to different ecosystems. They can live in really extreme conditions of temperature, salinity and pressure, they can even live inside other terrestrial and aquatic organisms. In aquatic organisms, such as fishes, the microbiota is associated with the skin, gills and gastrointestinal tract, where different species live stably and interact with each other, self-regulating its numerical concentration (Merrifield and Rodiles, 2015).

The composition of the microbial community in the teleost fish intestine is initially made up of aerobic, facultative, anaerobic and obligate anaerobic bacteria (Llewellyn *et al.*, 2014). Subsequent colonization will depend on several factors such as the stage of host development, nutrient absorption, the physiological state of the fish, environmental conditions, diet, and others (Ghanbari *et al.*, 2015).

Some bacterial species of the fish microbiota can be beneficial for the host, playing a role in the immune system modulation and the production of antagonistic compounds against pathogens, influencing the host's vulnerability to certain diseases (Dridner *et al.*, 2016; López *et al.*, 2020). They can influence the production of digestive enzymes, such as proteases, amylases, chitinases and lipases that help solubilize dietary elements. They can also provide the host with enzymes to digest dietary compounds that the hosts by itself cannot take advantage of (Butt and Volkoff, 2019), thus having an influence on the fish growth and development (Kersarcodi-Watson *et al.*, 2007). They influence immune system gene expression and other genes related to stress in the host and help improve antioxidant enzyme activity (Buruiana *et al.*, 2014). That is why some bacteria are considered as probiotics such as *Bacillus* sp.

To identify components of the gut microbiota, there are traditional microbiology methods and methods that use molecular biology. In traditional microbiology, various commercial culture media are currently available to be used for the isolation and identification of microorganisms of interest for food production, aquaculture and clinical microbiology (Tortora *et al.*, 2007). The most used

dispone actualmente de diversos medios de cultivo comerciales que se utilizan para el aislamiento y la identificación de microorganismos de interés para la producción de alimentos, la acuicultura y la microbiología clínica (Tortora *et al.*, 2007). El medio de cultivo más utilizado es el agar triptona soya (TSA). La identificación basada únicamente en la microbiología tradicional tiene el inconveniente de que sólo se puede identificar la fracción cultivable de la microbiota, que es mucho menor que la microbiota total.

Estudios realizados con trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) revelan que el cultivo de bacterias en medio TSA es el 18% respecto a su microbiota total (Navarrete *et al.*, 2010). Otro estudio realizado con salmón atlántico (*Salmo salar*) determinó que las bacterias cultivables son aproximadamente < 1% del total de bacterias (Navarrete *et al.*, 2009).

Una forma de abordar el estudio de la microbiota cultivable es utilizar herramientas tanto microbiológicas como moleculares cultivando y aislando colonias para posteriormente secuenciar el gen ARNr 16S, que es el método más utilizado para la identificación molecular de bacterias. Esto tiene la ventaja de que la identificación no sólo se basa en factores morfológicos y bioquímicos, sino que la información genética hace que la identificación sea más sólida. El número de estudios que utilizan estas herramientas es cada vez mayor (Navarrete *et al.*, 2012; Do Vale *et al.*, 2017; Zatán *et al.*, 2020).

Se estudió la comunidad bacteriana del tracto intestinal de *Epinephelus coioides* mediante el aislamiento y cultivo de cepas seguido de la secuenciación del gen ARNr 16S. Los autores determinaron que los géneros más abundantes fueron *Acinetobacter*, *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Psychrobacter* (Sun *et al.*, 2009).

La estructura de la microbiota depende de las condiciones ambientales y de la dieta, por lo que cabría esperar que existieran diferencias en la microbiota intestinal entre los peces de agua dulce y los marinos (Dehler *et al.* 2017). Wang *et al.* (2018) informaron de que los microbios intestinales predominantes de los peces marinos son anaerobios facultativos del género *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Corynebacterium*, *Alteromonas*, *Flavobacterium* y *Micrococcus* (Ou *et al.*, 2021).

Varios autores han descrito el efecto de la dieta en la microbiota intestinal. Los peces herbívoros eran ricos en bacterias

culture media is Tryptone Soy Agar (TSA). Identification based only on traditional microbiology has the disadvantage that only the culturable fraction of the microbiota could be identified, which is much smaller than total microbiota.

Studies carried out with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reveal that the cultivation of bacteria in TSA medium is 18 % on average with respect to its total microbiota (Navarrete *et al.*, 2010). Another study carried out with Atlantic salmon (*Salmo salar*) determined that culturable bacteria are approximately <1 % of the total bacteria (Navarrete *et al.*, 2009).

One way to approach the study of the culturable microbiota is to use both microbiological and molecular tools by cultivating and isolating colonies to subsequently sequence the 16S rRNA gene, which is the most used method for the molecular identification of bacteria. This has the advantage that identification is not only based on morphological and biochemical factors, but that genetic information makes identification more robust. The number of studies that use these tools is increasing (Navarrete *et al.*, 2012; Do Vale *et al.*, 2017; Zatán *et al.*, 2020).

The bacterial community of the intestinal tract of *Epinephelus coioides* was studied by isolating and culturing strains followed by 16S rRNA gene sequencing. The authors determined that the most abundant genera were *Acinetobacter*, *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Bacillus* and *Psychrobacter* (Sun *et al.*, 2009).

The structure of the microbiota depends on environmental conditions and diet, it could be expected that difference would exist in the gut microbiota between freshwater and marine fish (Dehler *et al.* 2017). Wang *et al.* (2018) reported that the predominant intestinal microbes of marine fish are facultative anaerobes, comprising the genera *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Corynebacterium*, *Alteromonas*, *Flavobacterium* and *Micrococcus* (Zhang *et al.*, 2021).

The effect of diet on the gut microbiota has been reported by several authors. Herbivorous fish were rich in cellulose-degrading bacteria such as *Clostridium* sp., *Citrobacter* sp. and *Leptotrichia* sp. while in carnivores *Cetobacterium* sp. and *Halomonas* sp. were dominant (Liu *et al.*, 2016).

Epinephelus morio is a carnivorous species but when kept in captivity there is a change in diet. Semi-moist food is provided, composed of fresh foods such as fish, shrimp, rich in protein,

degradadoras de celulosa como *Clostridium* sp., *Citrobacter* sp. y *Leptotrichia* sp. mientras que en los carnívoros dominaban *Cetobacterium* sp. y *Halomonas* sp. (Liu *et al.*, 2016).

Epinephelus morio es una especie carnívora pero cuando se mantiene en cautividad se produce un cambio en la dieta. La comida semi-húmeda se suministra compuesta por alimentos frescos como pescado, camarones, ricos en proteínas, ligados a la harina de pescado, uno de los componentes más caros de la dieta, por lo que se tiende a sustituirla por otros componentes. Lograr una digestión y absorción eficientes del alimento de los peces en cautiverio es uno de los objetivos de los productores. El uso de probióticos puede contribuir en este sentido. El objetivo de investigación es realizar la primera aproximación a la identificación de la microbiota cultivable de *E. morio* y determinar su potencial como probiótico para utilizarlo en la mejora de la digestión y absorción de los meros en cautiverio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

Se utilizaron peces adultos silvestres de la costa norte de Yucatán, México, entre Celestún y Dzilam de Bravo. Se utilizaron seis peces de entre 3-7 kg de peso mantenidos en cautiverio en el área de cría de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI), Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM. Los peces se anestesiaron con aceite de clavo y se introdujo una sonda en la cloaca para tomar una muestra del contenido intestinal. Las sondas se colocaron en un tubo eppendorf con 1 ml de solución estéril de NaCl al 0,85 % y se agitaron enérgicamente para extraer la muestra. Se prepararon diluciones seriadas (10^{-1} - 10^{-3}) y se distribuyeron 100 ml de cada una en placas Petri por duplicado en dos tipos de medios de cultivo: agar marino y TSA (agar triptona soya) y se cultivaron a 22 °C durante siete días. El crecimiento bacteriano comenzó a controlarse 24 horas después. El muestreo se realizó una vez al año en el periodo comprendido entre 2019-2024.

Aislamiento de la microbiota cultivable

En la placa de cultivo de dilución 10^{-3} fue posible visualizar colonias bien aisladas y se seleccionaron las que eran morfológicamente diferentes teniendo en cuenta el color, los bordes y la textura. Posteriormente, se contaron las colonias formadas a partir de

bound with fish meal, one of the most expensive components of the diet, so there is a tendency to replace it with other components. Achieving efficient digestion and absorption of food from captive fish is one of the goals of producers. The use of probiotics can contribute in this sense. Our research objective is to make the first approach to the identification of the culturable microbiota of *E. morio* and determine its potential as a probiotic to use on improving the digestion and absorption of groupers in captivity.

MATERIALS AND METHODS

Sampling

Adult fish from the natural habitat on the northern coast of Yucatan, México, between Celestun and Dzilam de Bravo were used. Six fish weighing between 3-7 kg kept in captivity in the breeding area of Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI), Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM, were used. The fish were anesthetized with clove oil and a probe was inserted into the cloaca to take a sample of the intestinal contents. The probes were placed in an eppendorf tube with 1 ml of sterile 0.85 % NaCl solution and shaken vigorously to extract the sample. Serial dilutions (10^{-1} - 10^{-3}) were prepared and 100 ml of each were distributed in Petri dishes in duplicate in two types of culture media: marine agar and TSA (tryptone soy agar) and cultivated at 22 °C for 7 days. Bacterial growth began to be monitored 24 hours later. Sampling was carried out once a year in the period between 2019-2024.

Isolation of culturable microbiota

In the 10^{-3} dilution culture plate it was possible to have well isolated colonies and those that were morphologically different considering color, edges and texture were selected. Subsequently, the colonies formed from all samples were counted and the colony forming units per milliliter (CFU/ml) was calculated as following:

UFC/ml= number of colonies counted $\times$ dilution factor/ Sample volume plated. The isolated colonies selected were cultured independently in tryptone soy broth (TSB) and incubated at 37 °C for 24 h in a shaker, then streaked on a plate with TSA medium and incubated at 37 °C for 24 hours. The isolates were named with a code composed of the letters MS referring to the name of the fish (Mero in Spanish) and the method of collecting the gut content samples (Sonda in Spanish), followed by consecutive numbers

todas las muestras y se calcularon las unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml) de la siguiente manera:

UFC/ml= número de colonias contadas × factor de dilución/volumen de muestra sembrado. Las colonias aisladas seleccionadas se cultivaron independientemente en caldo de tripton y soya (TSB) y se incubaron a 37 °C durante 24 h en un agitador; a continuación, se pasaron a una placa con medio TSA y se incubaron a 37 °C durante 24 horas. Los aislados se denominaron con un código compuesto por las letras MS que hacen referencia al nombre del pez (Mero en español) y al método de recogida de las muestras de contenido intestinal (Sonda en español), seguidas de números consecutivos (de MS3 a MS36).

Extracción de ADN genómico, amplificación y secuenciación Sanger

A partir del cultivo puro en medio TSB, se obtuvieron los pellets bacterianos por centrifugación. Para la extracción del ADN genómico se utilizó el Quick-DNA fecal/soil Microbe Microprep Kit (Zymo Research). El ADN se cuantificó en un fluorómetro Quantus (Promega Corporation) y se determinó su integridad en un gel de agarosa al 1%. El gen completo del ARNr 16S (~1500 pb) se amplificó mediante PCR y se secuenció con los cebadores 8F (5'-AGAGTTTGATCMTGGC-3'), 1492R (5'-TACCTTGTTACGACTT-3'), 518F (5'-CCAGCAGCCGCGGTAAT-3') y 787R (5'-GGGACTACCAGGGTATCTAAT-3'). La PCR se realizó con los cebadores 8F y 1492R utilizando la mezcla maestra Phusion Flash High Fidelity PCR (Thermo Fisher Scientific) siguiendo las instrucciones del fabricante. Las condiciones de amplificación fueron las siguientes 95 °C 3 min, 30 ciclos 95 °C 45 seg, 50 °C 50 seg, 72 °C 1 min y una extensión final 72 °C 15 min. Los amplicones se purificaron utilizando el DNA Clean & Concentrator TM-25 Kit (Zymo Research) y se enviaron a secuenciar por el método Sanger en el Instituto de Biotecnología UNAM (IBT, Cuernavaca, Morelos, México).

Análisis de secuencias e identificación taxonómica

Las secuencias se editaron con el software libre Chromas versión 2.6.6 (Technelysium Pty. Ltd.) y secuencias del gen casi completo se obtuvieron en Bioedit versión 7.2.5. (Hall, 1999). Se analizaron secuencias de ~1500 pb correspondientes al gen ARNr 16S casi completo.

(from MS3 to MS36).

Genomic DNA extraction, amplification and Sanger sequencing

From the pure culture in TSB medium, the bacterial pellets were obtained by centrifugation. For the extraction of genomic DNA, the Quick-DNA fecal/soil Microbe Microprep Kit (Zymo Research) was used. DNA was quantified in a Quantus Fluorometer (Promega Corporation) and its integrity was determined in a 1% agarose gel. The complete 16SrRNA gene (~1500 bp) was amplified by PCR and sequenced with the primers 8F (5'-AGAGTTTGATCMTGGC-3'), 1492R (5'-TACCTTGTTACGACTT-3'), 518F (5'-CCAGCAGCCGCGGTAAT-3') and 787R (5'-GGGACTACCAGGGTATCTAAT-3'). The PCR was performed with primers 8F and 1492R using the Phusion Flash High Fidelity PCR master mix (Thermo Fisher Scientific) according to the instructions of the manufacturer. Amplification conditions were as follows: 95 °C 3 min, 30 cycles 95 °C 45 sec, 50 °C 50 sec, 72 °C 1 min and a final extension 72 °C 15 min. The amplicons were purified using the DNA Clean & Concentrator TM-25 Kit (Zymo Research) and sent to sequence by the Sanger method in the Instituto de Biotecnología UNAM (IBT, Cuernavaca, Morelos, México).

Sequence analysis and taxonomic identification

Sequences were edited in the Chromas free software version 2.6.6 (Technelysium Pty. Ltd.) and sequences of the nearly full gene obtained in Bioedit version 7.2.5. (Hall, 1999). Sequences of ~1500 bp corresponding to the nearly full 16S rRNA gene were analyzed.

To determine the taxonomic identity of the isolates BLASTn program was used. The Core nucleotide database and the Megablast alignment algorithm were used. The hits with the highest percentage of identity and cover percentage = 100% were selected, if several hits coincided with the same identity, the one with the highest percentage of coverage was taken. To confirm the molecular identification of the isolates two strategies were followed: 1) Search in other sequence databases, including RNCentral and SILVA, 2) The evolutionary history was inferred using the Neighbor-Joining method (Saitou and Nei, 1987). The optimal tree is shown. The percentage of replicate trees in which the associated taxa clustered together in the bootstrap test (1000 replicates) are shown next to the branches (Felsenstein, 1985).

Para determinar la identidad taxonómica de los aislados se utilizó el programa BLASTn. Se utilizó la base de datos de nucleótidos Core y el algoritmo de alineación Megablast. Se seleccionaron las coincidencias con mayor porcentaje de identidad y porcentaje de cobertura = 100%, si varias coincidían con la misma identidad, se tomó la de mayor porcentaje de cobertura. Para confirmar la identificación molecular de los aislados se siguieron dos estrategias: 1) Búsqueda en otras bases de datos de secuencias, incluidas RNACentral y SILVA, 2) La historia evolutiva se dedujo utilizando el método Neighbor-Joining (Saitou y Nei, 1987). Se muestra el árbol óptimo. Junto a las ramas se muestra el porcentaje de árboles replicados en los que los taxones asociados se agruparon en la prueba bootstrap (1000 réplicas) (Felsenstein, 1985). Las distancias evolutivas se calcularon utilizando el método Tamura-Nei (Tamura y Nei, 1993) y están en unidades del número de sustituciones de bases por sitio. La variación de la tasa entre sitios se modeló con una distribución gamma (parámetro de forma = 1). Este análisis incluyó 89 secuencias nucleotídicas, 22 secuencias procedentes de los aislados obtenidos en nuestro estudio (código de MS3 a MS36), 17 secuencias procedentes de los aciertos resultantes de la alineación en el GenBank de las secuencias de los aislados mediante BLAST (los números de acceso figuran en la Tabla 1), y 36 secuencias de referencia del GenBank que representan todos los géneros identificados en los aislados. Todas las secuencias procedían de genes ARNr 16S. Se eliminaron todas las posiciones ambiguas de cada par de secuencias (opción de eliminación por pares). En el conjunto de datos final había un total de 1,739 posiciones. Los análisis evolutivos se realizaron en el programa informático MEGA 11 (Tamura et al., 2021). La secuencia del gen ARNr 16S de *Aquificae bacterium* clon SHNS 732 (número de acceso GenBank: HM110206.1) se incluyó como grupo externo.

Actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica

Los aislados conservados a -80 °C se cultivaron en placas TSA a 37 °C durante 24 h. Posteriormente, se inoculó una sola colonia de cada aislado en 2 ml de medio TSB y se incubó a 37 °C durante 24 h con agitación constante. Para determinar la actividad amilolítica, los aislados se cultivaron en medio de agar almidón al 1% y se incubaron a 37 °C durante 24-72 h. A continuación, se realizó la tinción añadiendo Lugol al 1% (Reda et al., 2018). Las muestras positivas mostraban un halo marrón

The evolutionary distances were computed using the Tamura-Nei method (Tamura and Nei, 1993) and are in the units of the number of base substitutions per site. The rate variation among sites was modeled with a gamma distribution (shape parameter = 1). This analysis involved 89 nucleotide sequences, 22 sequences from the isolates obtained in our study (code from MS3 to MS36), 17 sequences from the hits resulting from the GenBank alignment of the isolate sequences using BLAST (accession numbers are shown in Table 1), and 36 GenBank reference sequences representing all genera identified in the isolates. All sequences were from 16S rRNA genes. All ambiguous positions were removed for each sequence pair (pairwise deletion option). There were a total of 1739 positions in the final dataset. Evolutionary analyses were conducted in MEGA11 software (Tamura et al., 2021). The 16S rRNA gene sequence of *Aquificae bacterium* clone SHNS 732 (accession number GenBank: HM110206.1) was included as an outgroup.

Amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity

The isolates kept at -80 °C were cultivated in TSA plates at 37 °C for 24 h. Subsequently, a single colony of each isolate was inoculated in 2 ml of TSB medium and incubated at 37 °C for 24 h with constant shaking. To determine the amylolytic activity, the isolates were cultivated on 1% starch agar medium and incubated at 37 °C for 24-72 h. Staining was then carried out by adding 1% Lugol (Reda et al., 2018). Positive samples showed a light brown halo around the bacterial growth after staining indicating that the starch has been hydrolyzed; on the contrary, if a deep blue halo was observed, it indicated that the starch had not been hydrolyzed and therefore the isolate was considered negative for the production of starch degrading enzymes. Chitinolytic activity was determined by cultivating the isolates from the inocula in a culture medium containing: 5 g of colloidal chitin, 0.5 g of yeast extract, 0.2 g of peptone and 15 g of agar (Cabra et al., 2014). They were incubated at 37 °C for 72 h. Positive samples would show a transparent halo around them because of the degradation of chitin by hexokinase enzymes. The proteolytic activity was determined by cultivating the inocula in Trypticase Soy Agar culture medium with 10 % skim milk (Reda et al., 2018). Positive samples showed a transparent halo around them indicating casein degradation.

claro alrededor del crecimiento bacteriano tras la tinción, lo que indicaba que el almidón había sido hidrolizado; por el contrario, si se observaba un halo azul intenso, indicaba que el almidón no había sido hidrolizado y, por tanto, el aislado se consideraba negativo para la producción de enzimas degradadoras del almidón. La actividad quitinolítica se determinó cultivando los aislados de los inóculos en un medio de cultivo que contenía: 5 g de quitina coloidal, 0.5 g de extracto de levadura, 0.2 g de peptona y 15 g de agar (Cabra *et al.*, 2014). Se incubaron a 37 °C durante 72 h. Las muestras positivas mostrarían un halo transparente a su alrededor debido a la degradación de la quitina por las enzimas hexoquinasas. La actividad proteolítica se determinó cultivando los inóculos en medio de cultivo Agar de Soya Trypticase con un 10% de leche desnatada (Reda *et al.*, 2018). Las muestras positivas mostraban un halo transparente a su alrededor que indicaba la degradación de la caseína.

RESULTADOS

Caracterización morfológica de la microbiota cultivable

A partir de los cultivos obtenidos del contenido intestinal de peces silvestres y en cautiverio (2019-2024), se pudieron contar las colonias de forma independiente en la dilución 10^{-3} . Se aislaron 22 colonias con diferentes morfologías, 12 en medio TSA y 10 en agar marino. En el medio TSA, las colonias mostraron un tamaño menor en comparación con el medio marino. En el medio marino se observaron colonias de morfología redondeada, diferentes tamaños, colores que incluían claro, oscuro y blanco, beige, y bordes bien definidos. También se observaron colonias redondeadas de diferentes tamaños y de color beige claro y rosa en el medio TSA. El recuento medio de unidades formadoras de colonias en los medios de cultivo Marino y TSA fue de 7.8×10^4 UFC/ 100 μ l y 1.56×10^4 UFC/ 100 μ l respectivamente.

Identidad taxonómica y análisis filogenético

Todas las secuencias presentaban una identidad del 99 % al 100 % con las secuencias del gen ARNr 16S de bacterias de la base de datos GenBank y todos los aislados pudieron asignarse a un género y una especie descritos previamente. La estructura de la microbiota cultivable a nivel de filo estaba formada por Proteobacterias, Firmicutes y Actinobacterias. La especie más representada fue *Photobacterium damsela*. *Shewanella* sp. y *Vibrio* sp. sólo se observaron en muestras cultivadas en medio

RESULTS

Morphological characterization of the culturable microbiota

From the cultures obtained of intestinal contents of wild and captive fish (2019-2024), colonies could be counted independently at the 10^{-3} dilution. Twenty-two colonies with different morphologies were isolated, 12 in TSA medium and 10 in Marine agar. In TSA medium, colonies showed smaller size compared to marine medium. Colonies with round morphology, different sizes, colors including light, dark and white, beige, and well-defined edges were observed in marine medium. Rounded colonies of different sizes, and light beige and pink color were also shown in the TSA medium. The average count of colony-forming units in Marine and TSA culture medium was 7.8×10^4 CFU/ 100 μ l and 1.56×10^4 CFU/ 100 μ l respectively.

Taxonomic identity and phylogenetic analysis

All sequences showed 99 to 100 % identity with 16S rRNA gene sequences of bacteria in the GenBank database and all isolates could be assigned to a previously described genus and species. The structure of the culturable microbiota at the phylum level was formed by Proteobacteria, Firmicutes and Actinobacteria. The most represented species was *Photobacterium damsela*. *Shewanella* sp. and *Vibrio* sp. were only observed in samples cultured in marine medium. *Enterobacter* sp. and *Bacillus* sp. only grew in TSA medium, unlike *Enterococcus* sp., which grew in marine medium and TSA. *Cytobacillus* sp., *Vibrio* sp., *Acinetobacter* sp., *Shewanella* sp. and *Bacillus* sp. had little presence, it only grew in one sample (Table 1).

marino. *Enterobacter* sp. y *Bacillus* sp. sólo crecieron en medio TSA, a diferencia de *Enterococcus* sp., que creció en medio marino y TSA. *Cytobacillus* sp., *Vibrio* sp., *Acinetobacter* sp., *Shewanella* sp. y *Bacillus* sp. tuvieron poca presencia, sólo crecieron en una muestra (Tabla 1).

Tabla 1. Asignación taxonómica de aislados de la microbiota intestinal de *E. morio* a partir de secuencias de ARNr16S en diferentes bases de datos. / Taxonomic assignment of isolates of *E. morio* gut microbiota from rRNA16S sequences in different databases/Tabla 1. Asignación taxonómica de aislados de la microbiota intestinal de *E. morio* a partir de secuencias de ARNr16S en diferentes bases de datos.

Filo / Phylum	Asignación taxonómica RNAcentral / Taxonomic assignment RNAcentral	Asignación taxonómica SILVA/ Taxonomic assignment SILVA	Asignación taxonómica Genbank / Taxonomic assignment Genbank	Aislado/ Isolate	Medio de cultivo/ Culture medium
Actinobacterias	<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Micrococcus</i> sp.	MS27	TSA
	<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Micrococcus</i> sp.	MS31	TSA
	<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Micrococcus luteus</i>	MS32	TSA
	<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Micrococcus luteus</i>	MS35	TSA
	<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Micrococcus</i> sp.	MS36	TSA
Firmicutes	<i>Bacillus infantis</i>	<i>Bacillus</i> sp.	<i>Bacillus infantis</i>	MS33	TSA
	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Bacillus</i> sp.	<i>Cytobacillus gottheilii</i>	MS18	TSA
	<i>Enterococcus faecium</i>	<i>Enterococcus</i> sp.	<i>Enterococcus faecium</i>	MS3	TSA
	<i>Enterococcus faecium</i>	<i>Enterococcus</i> sp.	<i>Enterococcus faecium</i>	MS21	Agar marino
	<i>Staphylococcus hominis</i>	<i>Staphylococcus</i> sp.	<i>Staphylococcus</i> sp.	MS16	Agar marino
	<i>Staphylococcus warneri</i>	<i>Staphylococcus</i> sp.	<i>Staphylococcus warneri</i>	MS12	Agar marino

El cladograma filogenético mostró los tres filos de los aislados de la microbiota intestinal de *E. morio* (Proteobacteria, Actinobacteria y Firmicutes). El filo Proteobacteria fue el más representado con 11 aislados. En el clado más basal se sitúan los aislados MS4, MS22, MS23, MS24, MS25, MS28, MS30, todos los cuales se agruparon con las secuencias de referencia de *P. damselae*. El aislado MS34 se sitúa en el clado del género *Vibrio* sp., coincidiendo con la asignación taxonómica de las bases de datos. El aislado MS26 forma parte del clado del género *Enterobacter*, lo que concuerda con su identificación molecular a partir de bases de datos.

The phylogenetic cladogram showed the three phyla of the isolates from *E. morio* gut microbiota (Proteobacteria, Actinobacteria, and Firmicutes). The phylum Proteobacteria was the most represented with 11 isolates. In the most basal clade are located the isolates MS4, MS22, MS23, MS24, MS25, MS28, MS30, all of which clustered with the reference sequences of *Photobacterium damselae*. The MS34 isolate is located in the clade of the genus *Vibrio* sp., coinciding with the taxonomic assignment for it from the databases. The MS26 isolate is part of the genus *Enterobacter* clade consistent with its molecular identification from databases.

Del mismo modo, la localización del aislado MS29 coincidió con el clado *Shewanella* sp. MS19 fue el único aislado asociado al clado del género *Acinetobacter* sp. El filo Actinobacteria está representado únicamente por el género *Micrococcus* sp., del que había cinco aislados (MS27, MS31, MS32, MS35, MS36). En todos los casos, se confirma la asignación de género asignado en las bases de datos. El filo Firmicutes está representado por los géneros *Staphylococcus* (aislados MS12 y MS16), *Enterococcus* (aislados MS3 y MS21), *Bacillus* (MS33) y *Cytobacillus* (MS18), lo que coincide con la asignación taxonómica de estos aislados en las bases de datos SILVA, RNACentral y GenBank (Anexo 1).

Actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica

Los resultados de las actividades amilolítica, quitinolítica y proteolítica de los aislados se muestran en la Tabla 2. Los aislados de *Micrococcus* sp. (MS31 y 35) y *Bacillus* sp. (MS33) dieron positivo en las pruebas de actividad amilolítica y proteolítica. Los aislados con actividad amilolítica mostraban un halo marrón alrededor de la colonia, lo que indicaba que el almidón del medio de cultivo se había degradado (Figura 1).

Similarly, the location of MS29 isolate coincided with the *Shewanella* sp. clade. MS19 was the only isolate associated with the clade of the genus *Acinetobacter* sp. The phylum Actinobacteria is represented only by the genus *Micrococcus* sp., of which there were five isolates (MS27, MS31, MS32, MS35, MS36). In all cases, the genus assignment shown in the databases is confirmed. The phylum Firmicutes is composed of the genera *Staphylococcus* (isolates MS12 and MS16), *Enterococcus* (isolates MS3 and MS21), *Bacillus* (MS33) and *Cytobacillus* (MS18) which coincides with the taxonomic assignment of these isolates in SILVA, RNACentral and GenBank databases (Annexe 1).

Amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity

The results of the amylyolytic, chitinolytic and proteolytic activities of the isolates are shown in Table 2. The isolates of *Micrococcus* sp. (MS31 and 35) and *Bacillus* sp. (MS33) tested positive for amylyolytic and proteolytic activity. Isolates with amylyolytic activities showed a brown halo around the colony, which indicated that the starch in the culture medium had been degraded (Figure 1).

Tabla 2. Actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica de aislados de la microbiota intestinal de *E. morio*. / **Table 2.** Amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity of isolates from the gut microbiota of *E. morio*

Filo/Phylum	Asignación taxonómica GenBank/Taxonomic assignment	Aislado/ Isolate	Actividad amilolítica/ Amylolytic activity	Actividad quitinolítica/ Chitinolytic activity	Actividad proteolítica/ Proteolytic activity
Actinobacterias	<i>Micrococcus</i> sp.	MS27	-	-	-
	<i>Micrococcus</i> sp.	MS31	+	-	+
	<i>Micrococcus luteus</i>	MS32	-	-	-
	<i>Micrococcus luteus</i>	MS35	+	-	+
	<i>Micrococcus</i> sp.	MS36	-	-	-
Firmicutes	<i>Bacillus infantis</i>	MS33	+	-	+
	<i>Cytobacillus gottheilii</i>	MS18	-	-	-
	<i>Enterococcus faecium</i>	MS3	-	-	-
	<i>Enterococcus faecium</i>	MS21	-	-	+
	<i>Staphylococcus</i> sp.	MS16	-	-	+
	<i>Staphylococcus warneri</i>	MS12	-	-	+

Tabla 2. Actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica de aislados de la microbiota intestinal de *E. morio*. / **Table 2.** Amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity of isolates from the gut microbiota of *E. morio*

Proteobac- terias	<i>Acinetobacter lwoffii</i>	MS19	-	-	-
	<i>Enterobacter cloacae</i>	MS26	-	-	-
	<i>Shewanella</i> sp.	MS29	-	-	+
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS4	-	-	+
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS22	-	-	-
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS23	-	-	+
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS24	-	-	-
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS25	-	-	+
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS28	-	-	+
	<i>Photobacterium damse- lae</i>	MS30	-	-	+
	<i>Vibrio ponticus</i>	MS34	-	-	+



Figura 1. *Micrococcus* sp. MS35 aislado del contenido intestinal de mero rojo, en medio de cultivo agar almidón 1% teñido con lugol 1%. Positivo en actividad amilolítica.

Figure 1. *Micrococcus* sp. MS35 isolated from the intestinal contents of red grouper, in 1 % Starch agar culture medium stained with 1 % lugol. Positive for amylolytic activity.

Otros aislados sólo dieron positivo en actividad proteolítica, como: *Photobacterium damsela* (MS23, MS25, MS28 y MS30), *Enterococcus* sp. (MS21), *Staphylococcus* sp. (MS16), *Photobacterium* sp. (MS4), *Shewanella* sp. (MS29) y *Vibrio* sp. (MS34). En los aislados que dieron positivo para la actividad proteolítica se observó un cambio de color en el medio de cultivo, volviéndose transparente, lo que indicaba que la proteína láctea del medio de cultivo había sido degradada (Figura 2). La actividad quitinolítica fue negativa para todos los aislados.

Other isolates only tested positive for proteolytic activity such as: *Photobacterium damsela* (MS23, MS25, MS28 and MS30), *Enterococcus* sp. (MS21), *Staphylococcus* sp. (MS16), *Photobacterium* sp. (MS4), *Shewanella* sp. (MS29) and *Vibrio* sp. (MS34). In isolates that tested positive for proteolytic activity a color change was observed in the culture medium, becoming transparent, which indicated that the milk protein in the culture medium had been degraded (Figure 2). Chitinolytic activity was negative for all isolates.



Figura 2. *Micrococcus* sp. MS35 aislado del contenido intestinal de mero rojo, en medio de cultivo agar tripticasa de soja con 10 % de leche desnatada. Izquierda: medio de cultivo sin bacterias. Derecha: medio de cultivo con crecimiento de *Micrococcus* sp. MS35 aislado positivo para actividad proteolítica.

Figure 2. *Micrococcus* sp. MS35 isolated from the intestinal contents of red grouper, in culture medium trypticase soy agar with 10 % skim milk. Left: culture medium without bacteria. Right: culture medium with growth of *Micrococcus* sp. MS35 isolate positive for proteolytic activity

DISCUSIÓN

Asignación taxonómica

La aplicación tanto de la microbiología tradicional como de herramientas moleculares para la identificación de la microbiota intestinal es una estrategia útil para caracterizar las bacterias cultivables en acuicultura, aunque se trata de un enfoque que permite inferir la taxonomía sobre todo a nivel de género, alcanzando en unos pocos casos el nivel de especie. Esto se debe a que el gen ARNr 16S, a pesar de tener regiones hipervariables, es un gen muy conservado en bacterias, por lo que su secuencia es muy similar en muchas especies. Esto hace que estos métodos no sean 100% fiables para la asignación taxonómica a nivel de especie. SILVA es una base de datos

DISCUSSION

Taxonomic assignment

The application of both traditional microbiology and molecular tools for the identification of gut microbiota is a useful strategy to characterize culturable bacteria in aquaculture, although it is an approach that allows taxonomy to be inferred mostly at the genus level, in a few cases reaching the species level. This is because the 16S rRNA gene, despite having hypervariable regions, is a highly conserved gene in bacteria, therefore its sequence is very similar in many species. This makes these methods not 100 % reliable for taxonomic assignment at the species level. SILVA is a database that can be considered more conservative, and for the 16S rRNA gene, it makes assignments at the genus level.

que puede considerarse más conservadora, y para el gen ARNr 16S, realiza asignaciones a nivel de género. Sin embargo, las bases de datos RNACentral y GenBank asignaron estos aislados al nivel de especie ([Anexo 1. material suplementario](#)). Teniendo en cuenta la limitación con las bases de datos para llegar a la asignación a nivel de especie y la ubicación de los aislados en la filogenia, decidimos hacer la asignación taxonómica hasta el nivel de género, con la excepción de los aislados de *P. damselae*, que presentan una fuerte similitud en la filogenia de todos los aislados con las secuencias de referencia de *P. damselae*.

Cultivar y caracterizar la microbiota del mero rojo permitirá seguir estudiando su potencial como probiótico, así como su contribución a la nutrición y al sistema inmunitario del huésped ([Nayak, 2010](#)). Nuestros resultados mostraron que la estructura de la microbiota intestinal cultivable del mero rojo estaba compuesta por Proteobacterias, Firmicutes y Actinobacterias. Estos resultados concuerdan con los de [Tang Xiao et al. \(2021\)](#) que estudiaron el perfil de la microbiota en *Epinephelus coioides*, donde se determinó que Proteobacteria y Firmicutes eran los filos bacterianos más abundantes. Estudios recientes destacan que los filos Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria, Fusobacteria, Bacteroidetes y Tenericutes son los más dominantes en el tracto gastrointestinal de los peces teleósteos ([Egerton et al., 2018](#); [Wang et al., 2018](#), [Perry et al., 2020](#), [Biyun et al., 2024](#)).

Las proteobacterias son un grupo que incluye principalmente bacterias anaerobias Gram negativas, con una amplia diversidad morfológica. Tienen gran importancia en el metabolismo funcional, fundamentalmente en el proceso de fijación de nitrógeno ([Yarza, 2014](#)). Se ha informado ampliamente de la presencia de bacterias de este grupo en peces carnívoros marinos, lo que indica que desempeñan un papel importante en las funciones vitales del hospedador. Se ha informado que las Proteobacterias podrían contribuir al proceso digestivo en la especie *Paracanthurus hepatus* (pez cirujano paleta), aportando varias enzimas ([Smriga et al., 2010](#)). [Sun et al. \(2011\)](#) afirmaron que algunos géneros de Proteobacterias pueden contribuir a la asimilación de la dieta y que su ausencia podría causar una disminución en el crecimiento de peces como *Epinephelus coioides*.

En nuestro estudio, las Proteobacterias constituyen el filo más abundante, lo que también se ha señalado en un estudio con individuos juveniles y preadultos de *Seriola lalandi* (medregal de cola amarilla). La composición de la microbiota se caracterizó

However, RNACentral and GenBank databases assigned these isolates to the species level ([Anex 1. supplementary material](#)). Considering the mentioned limitation of this method and regarding the databases to reach assignment at the species level and the location of the isolates in the phylogeny, we decided to make the taxonomic assignment up to the genus level, with the exception of the isolates of *Photobacterium damselae*, which have a strong similarity in the phylogeny of all the isolates with the reference sequences of *P. damselae*.

Cultivating and characterizing the red grouper microbiota will allow further study of its potential as probiotics as well as its contribution to nutrition and the host's immune system ([Nayak, 2010](#)). Our results showed that the structure of the culturable intestinal microbiota of the red grouper was composed of Proteobacteria, Firmicutes and Actinobacteria. These results agree with [Tang Xiao et al. \(2021\)](#) studying the microbiota profile in the grouper *E. coioides* where it was determined that Proteobacteria and Firmicutes were the most abundant bacterial phyla. Recent studies highlight that the phyla Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria, Fusobacteria, Bacteroidetes, and Tenericutes are the most dominant in the gastrointestinal tract of teleost fish ([Egerton et al., 2018](#); [Wang et al., 2018](#); [Perry et al., 2020](#); [Biyun et al., 2024](#)).

Proteobacteria is a group that includes mostly Gram-negative anaerobic bacteria, with a wide morphological diversity. They have great importance in functional metabolism, fundamentally in the nitrogen fixation process ([Yarza, 2014](#)). Bacteria of this group have been widely reported in marine carnivorous fish, indicating that they play an important role in the vital functions of the host. It has been reported that Proteobacteria could contribute to the digestive process in the species *Paracanthurus hepatus* (palette surgeonfish), providing several enzymes ([Smriga et al., 2010](#)). [Sun et al. \(2011\)](#) stated that some genera of Proteobacteria can contribute to the assimilation of the diet and that their absence could cause a decrease in the growth of fish such as the orange-spotted grouper *E. coioides*.

In our study, Proteobacteria constitute the most abundant phylum, which has also been reported in a study with juvenile and pre-adult individuals of *Seriola lalandi* (yellowtail amberjack). The composition of the microbiota was characterized by traditional isolation in trypticase soy agar (TSA) culture medium followed by sequencing and taxonomic identification by 16S rRNA.

mediante aislamiento tradicional en medio de cultivo de agar de soya triptícase (TSA), seguido de secuenciación e identificación taxonómica por ARNr 16S. Las Proteobacterias tenían una abundancia relativa del 46 % y se observó que una disminución de las Proteobacterias de clase Gamma en la microbiota intestinal podría ser la causa del bajo crecimiento en cultivo (Aguilera *et al.*, 2013).

Entre las Proteobacterias que aislamos del contenido intestinal de meros rojos silvestres adultos, la especie más representada fue *P. damsela* (aislados MS4, MS22, MS23, MS24, MS25, MS30), registrado como un patógeno generalista que afecta a una amplia variedad de peces, camarones, moluscos y crustáceos (Rivas *et al.*, 2013). Se ha documentado que la presencia de *P. damsela* en peces en cautiverio puede estar relacionada con condiciones de estrés (Magarinos *et al.*, 2001). También se han aislado *Photobacterium* sp. del contenido intestinal de robalos (*Centropomus* sp.) en medio de cultivo de caldo Man-Rogosa Sharpe (MRS) (Zatán *et al.*, 2020).

También se identificó *Acinetobacter* sp. (aislado MS19) en la microbiota cultivable del mero rojo, que son bacilos gramnegativos, no fermentadores, considerados patógenos oportunistas. Solo hay unos pocos estudios que registran de *A. lwoffii* como patógeno de peces, pero recientemente seis cepas bacterianas, aisladas de peces enfermos del género *Schizothorax*, fueron identificadas como *A. lwoffii* mediante morfología, pruebas bioquímicas y análisis de secuenciación del gen ARNr 16S (Kozłowska *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2018). Tienen una amplia distribución en el agua, el suelo, las plantas y los organismos acuáticos. La presencia de esta bacteria puede deberse a que en los peces en cautiverio suelen aparecer bacterias patógenas oportunistas asociadas a enfermedades propias del manejo en granja (Alcántara *et al.*, 2022).

También se identificó *Vibrio* sp. (aislado MS34) en la microbiota cultivable del mero rojo, aunque su presencia sólo se observó en un aislado de los 22 identificados. Es un bacilo patógeno gramnegativo con peligro potencial para los animales de acuicultura y está ampliamente distribuido entre los medios acuáticos (Gai *et al.*, 2022). Es posible que la presencia de *Vibrio* sp. en la microbiota intestinal del mero rojo en cautividad esté relacionada con la presencia de parásitos en algunos individuos notificada durante la manipulación.

Proteobacteria had a relative abundance of 46% and it was observed that a decrease in Gamma class Proteobacteria in the intestinal microbiota could be the cause of low growth in culture (Aguilera *et al.*, 2013).

Among the Proteobacteria that we isolated from the intestinal content of adult wild red grouper, the most represented species was *Photobacterium damsela* (MS4, MS22, MS23, MS24, MS25, MS30 isolates), reported as a generalist pathogen that affects a wide variety of fish, shrimp, mollusks and crustaceans (Rivas *et al.*, 2013). It has been documented that the presence of *P. damsela* in captive fish may be related to stress conditions (Magarinos *et al.*, 2001). *Photobacterium* sp. have also been isolated from the intestinal contents of snook (*Centropomus* sp.) in Man-Rogosa Sharpe (MRS) broth culture medium (Zatán *et al.*, 2020).

We also identified *Acinetobacter* sp. (MS19 isolate) in the culturable microbiota of the red grouper, which are gram-negative, non-fermentative bacilli, considered opportunistic pathogens. There are only a few studies reporting *A. lwoffii* as a pathogen of fish but recently six bacterial strains, isolated from diseased fish of the genus *Schizothorax*, were identified as *A. lwoffii* by morphology, biochemical tests and 16S rRNA gene sequencing analysis (Kozłowska *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2018). They have a wide distribution in water, soil, plants and aquatic organisms. The presence of this bacteria may be due to the fact that opportunistic pathogenic bacteria usually appear in captive fish associated with diseases typical of farm management (Alcántara *et al.*, 2022).

Vibrio sp. (MS34 isolate) was also identified in the culturable microbiota of red grouper although its presence was only observed in one isolate of the 22 identified. It is a Gram-negative bacillus pathogen with potential danger for aquaculture animals and is widely distributed among aquatic environments (Gai *et al.*, 2022). It is possible that the presence of *Vibrio* sp. in the intestinal microbiota of red grouper in captivity is related to the presence of parasites in some individuals reported during handling.

The pathogenicity of *Vibrio ponticus* was evaluated by the lethal dose test in coral trout. The fish were infested with an intramuscular injection of the isolate at different concentrations. Only the test fish challenged with the most concentrated isolate were found to exhibit a cumulative mortality of 100 % indicating that *V. ponticus* was pathogenic to the coral trout. The test fish

La patogenicidad de *Vibrio ponticus* se evaluó mediante la prueba de la dosis letal en la trucha coralina. Los peces fueron infectados con una inyección intramuscular del aislado a diferentes concentraciones. Sólo los peces sometidos a la prueba con el aislado más concentrado mostraron una mortalidad acumulada del 100 %, lo que indica que *V. ponticus* era patógeno para la trucha de coral. Los peces sometidos al desafío con el aislado mostraron signos de necrosis hepática y degeneración vacuolar de las células hepáticas (Gai *et al.*, 2022).

En los peces en cautiverio es normal la presencia de microorganismos porque los sistemas de cultivo no son asépticos. En este estudio, aunque hemos detectado la presencia de bacterias patógenas, ningún animal mostró signos de enfermedades por bacteriosis. Esto indica que sus condiciones fisiológicas y su sistema inmunitario son competentes y que, a pesar de la presencia de estas bacterias patógenas, los peces son capaces de crecer, desarrollarse y reproducirse con éxito. Tal vez la carga bacteriana no sea lo suficientemente alta como para causar enfermedades en estos peces en cautiverio.

Shewanella sp. (aislado MS29) también se encontraba en la microbiota intestinal de *E. morio* aunque sólo en un aislado de los 22 identificados. La mayoría de las especies del género *Shewanella* habitan en entornos acuáticos extremos, sus características distintivas incluyen una diversidad respiratoria sin precedentes y la capacidad de prosperar a bajas temperaturas (Hau y Gralnick., 2007).

Enterococcus sp. (aislados MS3 y MS21) fue uno de los géneros del filo Firmicutes que se identificó en la microbiota cultivable del mero rojo, un microorganismo anaerobio facultativo Gram positivo. Se ha demostrado que esta especie tiene potencial como probiótico en peces, lo que se abordará más adelante (Kim *et al.*, 2012).

También se aisló *Staphylococcus* sp. (MS12 y MS16) del contenido intestinal del mero rojo. El género *Staphylococcus*, que incluye especies como *S. aureus* y *S. epidermidis*, puede encontrarse en diferentes medios acuáticos y en peces, a menudo como parte de su microbiota normal o en infecciones asociadas a heridas o a una mala manipulación (Abedin *et al.*, 2020). Se ha aislado *S. warneri*, una bacteria Gram-positiva, de la epidermis de la piel de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). *Staphylococcus warneri* se aisló de células epiteliales sanas de la piel de truchas

challenged with isolate displayed the liver necrosis sign and the vacuolar degeneration of liver cells (Gai *et al.*, 2022).

In captivity fish it is normal the presence of microorganisms because culture systems are not aseptic. In our study, although we have detected the presence of pathogenic bacteria, no animal showed signs of bacteriosis diseases. This indicates that their physiological conditions and immune system are competent, and despite the presence of these pathogenic bacteria, the fish are capable of growing, developing and reproducing successfully. Perhaps the bacterial load is not high enough to cause disease in these captive fish.

Shewanella sp. (MS29 isolated) was also in the gut microbiota of *E. morio* although in only one isolate of the 22 identified. Most species of the genus *Shewanella* inhabit extreme aquatic environments, their hallmark features include unparalleled respiratory diversity and the capacity to thrive at low temperatures (Hau and Gralnick., 2007).

Enterococcus sp. (MS3 and MS21 isolates) was one of the genera of the phylum Firmicutes that was identified in the culturable microbiota of red grouper, a Gram-positive facultative anaerobic microorganism. It has been shown that this species has potential as a probiotic in fish, which will be addressed later (Kim *et al.*, 2012).

Staphylococcus sp. (MS12 and MS16) was also isolated from the intestinal contents of red grouper. The genus *Staphylococcus*, which includes species such as *S. aureus* and *S. epidermidis*, can be found in different aquatic environments and in fish, often as part of their normal microbiota or in infections associated with wounds or mishandling (Abedin *et al.*, 2020). *Staphylococcus warneri*, a Gram-positive bacterium, has been isolated from the skin epidermis of rainbow trout (*O. mykiss*). *Staphylococcus warneri* was isolated from healthy hatchery trout skin epithelial cells. This study demonstrated that *S. warneri* have the potential to become indirect pathobionts by enhancing growth and biofilm formation of pathogens such as *Vibrio anguillarum* (Musharrafieh *et al.*, 2014).

Bacillus sp. (MS33) was also isolated from *E. morio* gut microbiota, this is a species that has potential as a probiotic due to its ability to produce antimicrobial substances that are active against many microorganisms (Kuebutornye *et al.*, 2019). Finally, among the Actinobacteria that were isolated from the intestinal

de criadero. Este estudio demostró que *S. warneri* tiene el potencial de convertirse en patógeno indirecto al potenciar el crecimiento y la formación de biopelículas de patógenos como *Vibrio anguillarum* (Musharrafieh *et al.*, 2014).

También se aisló *Bacillus* sp. (MS33) de la microbiota intestinal de *E. morio*, esta es una especie que tiene potencial como probiótico debido a su capacidad para producir sustancias antimicrobianas que son activas contra muchos microorganismos (Kuebutornye *et al.*, 2019). Por último, entre las Actinobacterias que se aislaron del tracto intestinal del mero rojo se encontraba *Micrococcus* sp., una especie que suele ser inofensiva, pero que puede convertirse en un patógeno oportunista. Sobrevive en ambientes oligotróficos durante largos periodos de tiempo. Se ha aislado previamente del intestino de otros peces, e incluso se ha estudiado su potencial como probiótico, estimulante del crecimiento y promotor del sistema inmunitario en la tilapia del Nilo (El-Rhman *et al.*, 2009).

Potencial probiótico

Las bacterias presentes en la microbiota intestinal desempeñan un papel importante en la alimentación y la salud del huésped, de ahí que se atribuya su potencial como probiótico. Los probióticos podrían estimular el crecimiento aportando nutrientes, aumentar las actividades de las enzimas digestivas y la absorción de alimentos, mejorar la respuesta inmunitaria y modular la colonización microbiana (Selim y Reda, 2015; Xiao *et al.*, 2021).

Epinephelus morio en condiciones naturales tiene una dieta amplia compuesta por peces más pequeños, crustáceos y pulpos. Los peces en cautiverio utilizados en este estudio tenían una dieta basada en alimentos semi-húmedos compuestos por calamares, pescado, camarón, harina de pescado, pasta de soya, aceite de hígado de bacalao y premezcla vitamínica, por lo que la microbiota intestinal puede variar. Se ha descrito anteriormente que comparando la microbiota de peces que viven en lagos, arroyos y mares, las mayores diferencias en las comunidades microbianas se obtuvieron por factores relacionados con el hábitat del hospedero (Kim *et al.*, 2021). Aislar bacterias del intestino de *E. morio* con capacidad para degradar proteínas y carbohidratos permitirá diseñar un consorcio con potencial probiótico que pueda ser utilizado en la alimentación de individuos de mero rojo en cautiverio. En este estudio, se centró en evaluar la actividad amilolítica, quitinolítica y proteolítica de los aislados como

tract of the red grouper was *Micrococcus* sp., a species that is generally harmless, but can become an opportunistic pathogen. It survives in oligotrophic environments for long periods of time. It has been previously isolated from the intestine of other fish, and its potential as a probiotic, stimulating growth and as a promoter of the immune system in Nile Tilapia has even been studied (El-Rhman *et al.*, 2009).

Probiotic potential

The bacteria present in the gut microbiota play an important role in the diet and health of the host, hence its potential as a probiotic is attributed. Probiotics could stimulate growth by providing nutrients, increase the activities of digestive enzymes and food absorption, improve the immune response and modulate microbial colonization (Selim and Reda, 2015; Xiao *et al.*, 2021).

Epinephelus morio in natural conditions have a broad diet composed of smaller fish, crustaceans and octopuses. The captive fish used in our study had a diet based on semi-moist food composed of squid, fish, shrimp, fish meal, soybean paste, cod liver oil and vitamin premix so the gut microbiota can vary. It has been previously described that comparing the microbiota of fish that live in lakes, streams and the seas the largest differences in microbial communities were obtained for factors related to the host habitat (Kim *et al.*, 2021). Isolating bacteria from the intestine of *E. morio* with the capacity to degrade protein and carbohydrates will allow us to design a consortium with probiotic potential that can be used in feeding captive red grouper individuals. In our study, we focused on evaluating the amylolytic, chitinolytic and proteolytic activity of the isolates as a potential probiotic that contribute to nutrition and absorption of elements of the diet.

Proteolytic activity in most isolates could be explained by the red grouper carnivorous feeding habits, so it would be expected to find some bacteria with the capacity to degrade proteins.

We have not found chitinolytic activity in any of the isolates, this might be explained by the fact that the samples were taken in the distal part of the intestine and the degradation of chitin is something that is needed in the first instance when ingesting foods with chitinous cuticle, such as crabs. Perhaps in the anterior and middle portion of the intestine would be more likely to find bacteria with this activity, more studies would be necessary to confirm this assumption.

probiótico potencial que contribuye a la nutrición y absorción de elementos de la dieta.

La actividad proteolítica en la mayoría de los aislados podría explicarse por los hábitos alimentarios carnívoros del mero rojo, por lo que cabría esperar encontrar algunas bacterias con capacidad para degradar proteínas. No se encontró actividad quitinolítica en ninguno de los aislados, esto podría explicarse por el hecho de que las muestras se tomaron en la parte distal del intestino y la degradación de la quitina es algo que se necesita en primera instancia cuando se ingieren alimentos con cutícula quitinosa, como los cangrejos. Quizás en la porción anterior y media del intestino sería más probable encontrar bacterias con esta actividad, serían necesarios más estudios para confirmar esta suposición.

Para seleccionar los aislados con potencial probiótico, se analizarán las actividades enzimáticas y se tendrán en cuenta otros factores para la posterior selección. Según las actividades líticas, los aislados que podrían considerarse para el consorcio serían: MS33 (*Bacillus* sp.), MS35 y MS31 *Micrococcus* sp. (por su actividad amilolítica y proteolítica). Varias especies de estos géneros se han descubierto y utilizado como probióticos para mejorar el crecimiento y la inmunidad de las especies acuícolas (Kuebutornye *et al.*, 2019).

Se han estudiado las propiedades probióticas de *Bacillus infantis* aislado del tracto gastrointestinal del pez rohu (*Labeo rohita*). Los resultados indicaron que *B. infantis* posee buenas propiedades probióticas esenciales, con resistencia a los ácidos, las sales biliares y los jugos gástricos, así como una buena capacidad de adherencia a los hidrocarburos, y un efecto altamente antagonista contra los patógenos de los peces que sobreviven en el tracto gastrointestinal. Por lo tanto, puede actuar como probiótico potencial mejorando la inmunidad e inhibiendo el crecimiento de otros microorganismos nocivos (Dharmaraj *et al.*, 2014).

Se probó el efecto probiótico de *Micrococcus luteus* en la tilapia del Nilo. El mayor crecimiento, conversión alimenticia y eficiencia proteica (ganancia de peso/proteína) y respuesta inmunitaria frente a patógenos se consiguió cuando se utilizó *M. luteus* como probiótico. Los autores concluyeron que *M. luteus* mejoraba los parámetros inmunitarios inespecíficos en la tilapia del Nilo (El-Rhman *et al.*, 2009).

Recientemente, se ha demostrado que *M. luteus* puede

To select the isolates with probiotic potential, the enzymatic activities will be analyzed and other factors will be considered for the subsequent selection. According to lytic activities, the isolates that could be considered for the consortium would be: MS33 (*Bacillus* sp.), MS35 and MS31 *Micrococcus* sp. (for its amylolytic and proteolytic activity). Several species of these genera have been discovered and used as probiotics to improve the growth and immunity of aquaculture species (Kuebutornye *et al.*, 2019).

The probiotic properties of *Bacillus infantis* isolated from the gastrointestinal tract of rohu labeo (*Labeo rohita*) have been studied. The results indicated that *B. infantis* had good essential probiotics properties, having resistance to acid, bile salt, gastric juice condition, as well as a good capacity for adherence to hydrocarbons, and highly antagonistic effect against fish pathogens which survive in gastrointestinal tract. Therefore, it can act as potential probiotics enhancing the immunity and inhibiting the growth of other harmful microorganisms (Dharmaraj *et al.*, 2014).

The probiotic effect of *Micrococcus luteus* was tested in Nile Tilapia. The highest growth, feed conversion and protein efficiency (weight gain/g protein) and immune response against pathogens was achieved when *M. luteus* was used as a probiotic. Authors concluded that *M. luteus* improved non-specific immune parameters in Nile Tilapia (El-Rhman *et al.*, 2009).

Recently, it has been shown that *Micrococcus luteus* can be considered an emergent opportunistic pathogen in Tilapia from India. Naturally infected fish displayed lethargy, skin discoloration and erosion, detached scales, petechial hemorrhages, congestion and fin rot, and exophthalmia. The post-mortem examination indicated intestinal inflammation, liver congestion, hemorrhages, and distended gallbladder (Suresh *et al.*, 2024). However, studies in other species are needed to confirm this potential.

The MS21 isolate (*Enterococcus* sp.) could also be a candidate for the consortium due to its proteolytic activity. It has been shown the probiotic effect of *Enterococcus faecium* on the immune response of *Paralichthys olivaceus* (bastard halibut) to combat the pathogenicity of *Lactococcus garvieae* in previous studies. One study revealed that *E. faecium* induced immune-responsive compounds, protecting the marine fish *P. olivaceus* from lactococcosis (Kim *et al.*, 2012).

The MS29 isolate (*Shewanella* sp.) is another species that

considerarse un patógeno oportunista emergente en la tilapia de la India. Los peces infectados de forma natural presentaban letargo, decoloración y erosión de la piel, escamas desprendidas, hemorragias petequiales, congestión y putrefacción de las aletas, y exoftalmia. El examen post mortem indicó inflamación intestinal, congestión hepática, hemorragias y vesícula biliar distendida (Kummari *et al.*, 2024). Sin embargo, se necesitan estudios en otras especies para confirmar este potencial.

El aislado MS21 (*Enterococcus* sp.) también podría ser un candidato para el consorcio debido a su actividad proteolítica. En estudios anteriores se ha demostrado el efecto probiótico de *Enterococcus faecium* sobre la respuesta inmunitaria de *Paralichthys olivaceus* (halibut bastardo) para combatir la patogenicidad de *Lactococcus garvieae*. Un estudio reveló que *Enterococcus faecium* inducía compuestos inmunoresponsivos, protegiendo al pez marino *P. olivaceus* de la lactococosis (Kim *et al.*, 2012).

El aislado MS29 (*Shewanella* sp.) es otra especie que se recomienda como candidata para el consorcio bacteriano por la actividad proteolítica demostrada en este estudio. Se ha demostrado que la especie *Shewanella putrefaciens* tiene características probióticas en varias especies acuícolas. Entre los beneficios que aporta a sus huéspedes figuran una mayor protección contra las infecciones bacterianas, efectos sobre el sistema inmunitario, mayor crecimiento, mejor composición corporal y mejor aprovechamiento de los alimentos. También puede reducir la presencia de patógenos en el intestino, ayuda a sintetizar una mayor cantidad de ácidos grasos beneficiosos y a reducir el número y tamaño de las gotas de lípidos tanto en el hígado como en el intestino (Tapia-Paniagua *et al.*, 2014).

A pesar de la actividad proteolítica de MS34 (*Vibrio* sp.), MS4 (*P. damsela*) y MS16 (*Staphylococcus* sp.) estos aislados no son buenos candidatos para el consorcio bacteriano debido a su patogenicidad. Basándose en los resultados de este estudio, los aislados que se proponen para diseñar el consorcio con potencial probiótico son: MS31 y MS35 (*Micrococcus* sp.), MS33 (*Bacillus* sp.), MS21 (*Enterococcus* sp.) y MS29 (*Shewanella* sp.)

CONCLUSIONES

El uso de técnicas tanto de microbiología tradicional como de secuenciación del gen ARNr 16S permitió identificar la

we recommend as a candidate for the bacterial consortium for the proteolytic activity demonstrated in this study. It has been shown that the species *Shewanella putrefaciens* has probiotic characteristics on several aquaculture species. Among the benefits it provides to its hosts are greater protection against bacterial infections, effects on the immune system, greater growth, better body composition and better use of food. It can also reduce the presence of pathogens in the intestine, helps synthesize a greater amount of beneficial fatty acids and reduce the number and size of lipid droplets in both the liver and the intestine (Tapia-Paniagua *et al.*, 2014).

Despite the proteolytic activity of MS34 (*Vibrio* sp.), MS4 (*Photobacterium damsela*) and MS16 (*Staphylococcus* sp.) these isolates are not good candidates for the bacterial consortium due to its pathogenicity. Based on the findings of this study, the isolates that are proposed to design the consortium with probiotic potential are: MS31 and MS35 (*Micrococcus* sp.), MS33 (*Bacillus* sp.), MS21 (*Enterococcus* sp.) and MS29 (*Shewanella* sp.)

CONCLUSIONS

The use of both traditional microbiology and 16S rRNA gene sequencing techniques allowed us to identify the culturable gut microbiota of *Epinephelus morio* (red grouper). The composition of the red grouper microbiota agrees with the results in other studies performed in marine fish. *Micrococcus* sp., *Bacillus* sp., *Enterococcus* sp. and *Shewanella* sp. showed lytic activity so it can be proposed as candidates to be used as probiotics. Its use in the diet of red grouper individuals in captivity could help the digestion and absorption of food. Isolates that might be pathogens were not selected as candidates for the bacterial consortium although they showed lytic activities. To validate the probiotic potential of these isolates further studies will be necessary. The use of bacteria isolated from the red grouper's own intestinal tract as probiotics may be beneficial because these bacteria are already adapted to the physiological environment of the digestive system of red grouper, and there is a greater chance of success when incorporated into the diet. This study is the first to report culturable gut microbiota of *Epinephelus morio* and represents a contribution to the knowledge of the microbiota from marine fish and its probiotic potential.

microbiota intestinal cultivable de *Epinephelus morio* (mero rojo). La composición de la microbiota del mero rojo coincide con los resultados de otros estudios realizados en peces marinos. *Micrococcus* sp., *Bacillus* sp., *Enterococcus* sp. y *Shewanella* sp. mostraron actividad lítica por lo que pueden proponerse como candidatos a ser utilizados como probióticos. Su uso en la dieta de individuos de mero rojo en cautiverio podría ayudar a la digestión y absorción del alimento. Los aislados que podrían ser patógenos no se seleccionaron como candidatos para el consorcio bacteriano aunque mostraban actividades líticas. Para validar el potencial probiótico de estos aislados serán necesarios más estudios. El uso de bacterias aisladas del propio tracto intestinal del mero rojo como probióticos puede ser beneficioso porque estas bacterias ya están adaptadas al entorno fisiológico del sistema digestivo del mero rojo, y hay más posibilidades de éxito cuando se incorporan a la dieta. Este estudio es el primero en informar sobre la microbiota intestinal cultivable de *Epinephelus morio* y representa una contribución al conocimiento de la microbiota de los peces marinos y su potencial probiótico.

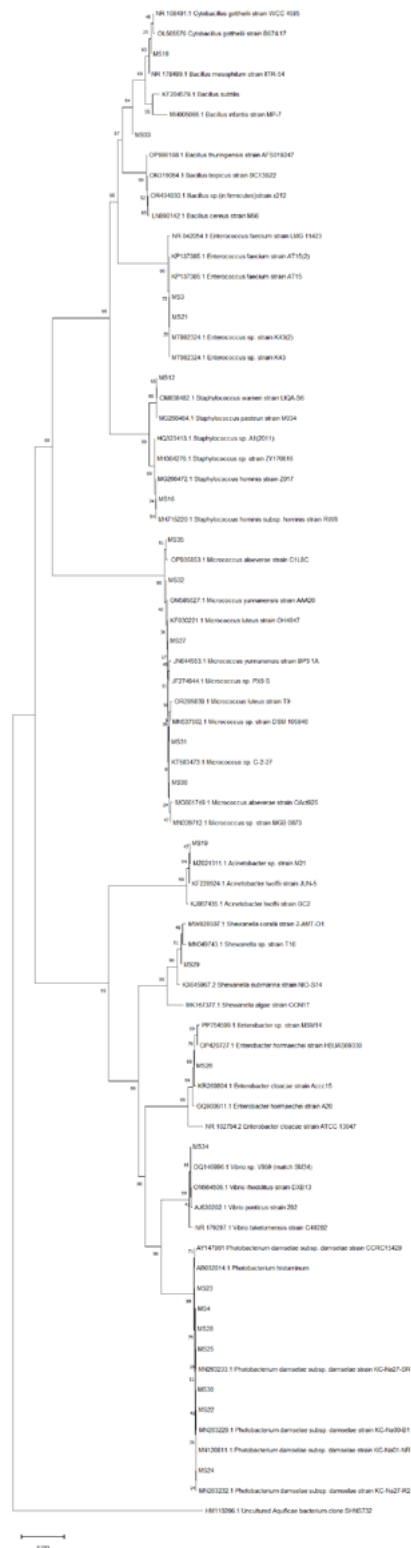
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM (Papiit-It200522) y el proyecto “Biotecnología del mero rojo *Epinephelus morio*” (UNAM-Sepasy). Los autores agradecen a la Secihti su apoyo financiero mediante la beca postdoctoral concedida a la Dra. Grecia Montalvo y al Dr. Manuel Valenzuela Jiménez por su apoyo en la recolección y el mantenimiento de meros.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by UNAM Research and Technological Innovation Projects Support Program (PAPIIT-IT200522) and the project “Biotechnology of the red grouper *Epinephelus morio*” (UNAM-SEPASY). The authors thank SECIHTI for financial support and the postdoctoral scholarship to Grecia Montalvo and Manuel Valenzuela Jiménez his support to collect and the maintenance of groupers.

ANEXOS/ANNEXES



Anexo 1. Relaciones filogenéticas, basadas en la secuencia de nucleótidos del gen ARNr 16S, de los aislados de la microbiota intestinal del mero rojo y las secuencias de referencia depositadas en GenBank. El árbol filogenético se generó mediante el método Neighbor-Joining con el programa informático MEGA 11. La asignación taxonómica de los aislados se muestra en la [Tabla 1](#).

Annexes1. Phylogenetic relationships, based on 16S rRNA gene nucleotide sequence, between isolates of gut microbiota of the red grouper and reference sequences deposited in GenBank. Phylogenetic tree was generated using the Neighbor-Joining method by the MEGA 11 software. The taxonomic assignment of the isolates is shown in [Table 1](#).

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Abd El-Rhman, A.M., Khattab, Y.A.E. and Shalaby, A.M.E. (2009). *Micrococcus luteus* and *Pseudomonas* species as probiotics for promoting the growth performance and health of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Fish & Shellfish Immunology*, 27(2), pp.175–180. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2009.03.020>.
- Abedin, M.Z., Rahman, S., Hasan, R., Shathi, J.H., Jarin, L. and Uz Zaman, S. (2020). Isolation, identification, and antimicrobial profiling of bacteria from aquaculture fishes in pond water of Bangladesh. *American Journal of Pure and Applied Biosciences*, 2(3), pp.39–50. <https://doi.org/10.34104/ajpab.020.039050>.
- Aguilera, E., Yany, G. and Romero, J. (2013). Cultivable intestinal microbiota of yellowtail juveniles (*Seriola lalandi*) in an aquaculture system. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(3), pp.395–403. <https://doi.org/10.3856/vol41-issue3-fulltext-3>.
- Alcántara-Jauregui, F.M., Valladares-Carranza, B. and Ortega, C. (2022). Enfermedades bacterianas y sus agentes etiológicos identificados en peces de México - Una revisión. *Revista MVZ Córdoba*, 27(2), pp.1–12. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2387>.
- Buruiană, C.T., Profir, A.G. and Vizireanu, C. (2014). Effects of probiotic *Bacillus* species in aquaculture. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI - Food Technology*, 38(2), pp.9–17. Available at: <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/food/article/view/1741/1470>
- Butt, R.L. and Volkoff, H. (2019). Gut microbiota and energy homeostasis in fish. *Frontiers in Endocrinology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00009>.
- Cabra, T., Rodríguez, C.A. y Villota, C.P. (2014). Capacidad antagonica y quitinolítica de microorganismos aislados de residuos de higuera (*Ricinus communis*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), pp. 56–61. Available at: <https://revistas.unicaedu.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/328/523>
- Cao, S., Geng, Y., Yu, Z., Deng, L., Gan, W., Wang, K., Ou, Y., Chen, D., Huang, X., Zuo, Z., He, M. and Lai, W. (2018). *Acinetobacter lwoffii*, an emerging pathogen for fish in *Schizothorax* genus in China. *Transboundary and Emerging Diseases*, 65(6), pp.1816–1822. <https://doi.org/10.1111/tbed.12957>.
- Dehler, C.E., Secombes, C.J. and Martin, S.A.M. (2017). Seawater transfer alters the intestinal microbiota profiles of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Scientific Reports*, 7(13877), pp.1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13249-8>.
- Dharmaraj, R. and Rajendren, V. (2014). Probiotic assessment of *Bacillus infantis* isolated from gastrointestinal tract of *Labeo rohita*. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(7), pp.1–6. Available at: <https://www.ijrsp.org/research-paper-0714/ijrsp-p3188.pdf> [Accessed 30 Apr. 2025].
- do Vale Pereira, G., da Cunha, D.G., Pedreira Mourino, J.L., Rodiles, A., Jaramillo-Torres, A. and Merrifield, D.L. (2017). Characterization of microbiota in *Arapaima gigas* intestine and isolation of potential probiotic bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 123(5), pp.1298–1311. <https://doi.org/10.1111/jam.13572>.
- Drider, D., Bendali, F., Naghmouchi, K. and Chikindas, M.L. (2016). Bacteriocins: Not only antibacterial agents. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 8(4), pp.177–182. <https://doi.org/10.1007/s12602-016-9223-0>.
- Egerton, S., Culloty, S., Whooley, J., Stanton, C. and Ross, R.P. (2018). The gut microbiota of marine fish. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00873>
- Felsenstein, J. (1985). Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap. *Evolution*, 39(4), pp.783–791. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1985.tb00420.x>.
- Gai, C., Liu, J., Zheng, X., Xu, L. and Ye, H. (2022). Identification of *Vibrio ponticus* as a bacterial pathogen of coral trout *Plectropomus leopardus*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.1089247>.
- Ghanbari, M., Kneifel, W. and Domig, K.J. (2015). A new view of the fish gut microbiome: Advances from next-generation sequencing. *Aquaculture*, 448(1), pp.464–475. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.06.033>.
- Hall, T.A. (1999). BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41(2), pp.95–98.
- Hau, H.H. and Gralnick, J.A. (2007). Ecology and biotechnology of the genus *Shewanella*. *Annual Review of Microbiology*, 61, pp.287–308. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093257>.
- Kesarcodi-Watson, A., Kaspar, H., Lategan, M.J. and Gibson, L. (2008). Probiotics in aquaculture: The need, principles and mechanisms of action and screening processes. *Aquaculture*, 274(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.019>.
- Kim, Y.-R., Kim, E.-Y., Choi, S., Hossain, M.T., Oh, R., Heo, W.-S., Lee, J.M., Cho, Y.C. and Kong, I.-S. (2012). Effect of a Probiotic strain, *Enterococcus faecium*, on the immune responses of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22(4), pp.526–529. <https://doi.org/10.4014/jmb.1108.08047>.
- Kim, P.S., Shin, N.-R., Lee, J.-B., Kim, M.-S., Whon, T.W., Hyun, D.-W., Yun, J.-H., Jung, M.-J., Kim, J.Y. and Bae, J.-W. (2021). Host habitat is the major determinant of the gut microbiome of fish. *Microbiome*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01113-x>.
- Kozińska, A., Paździor, E., Pękala, A. and Niemczuk, W. (2014). *Acinetobacter johnsonii* and *Acinetobacter lwoffii* - the emerging fish pathogens. *Journal of Veterinary Research*, 58(2), pp.193–199. <https://doi.org/10.2478/bvip-2014-0029>.
- Kuebutornye, F.K.A., Abarike, E.D. and Lu, Y. (2019). A review on the application of *Bacillus* as probiotics in aquaculture. *Fish & Shellfish Immunology*, 87, pp.820–828. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.02.010>.
- Liu, H., Guo, X., Gooneratne, R., Lai, R., Zeng, C., Zhan, F. and Wang, W. (2016). The gut microbiome and degradation enzyme activity of wild freshwater fishes influenced by their trophic levels. *Nature. Scientific Reports*, 6(24340), pp.1–12. <https://doi.org/10.1038/srep24340>.
- Llewellyn, M.S., Boutin, S., Hoseinifar, S.H. and Derome, N. (2014). Teleost microbiomes: the state of the art in their characterization, manipulation and importance in aquaculture and fisheries. *Frontiers in Microbiology*, 5, pp.1–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00207>.
- López Nadal, A., Ikeda-Ohtsubo, W., Sipkema, D., Peggs, D., McGurk, C., Forlenza, M., Wiegertjes, G.F. and Brugman, S. (2020). Feed, microbiota, and gut immunity: Using the zebrafish model to understand fish health. *Frontiers in Immunology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00114>.
- Magariños, B., Couso, N., Noya, M., Merino, P., Toranzo, A.E. and Lamas, J. (2001). Effect of temperature on the development of pasteurellosis in carrier gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 195(1-2), pp.17–21. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00547-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00547-0).
- Merrifield, D.L. and Rodiles, A. (2015). The fish microbiome and its interactions with mucosal tissues. In: B.H. Beck and E. Peatman, eds., *Mucosal Health in Aquaculture*. Elsevier, pp.273–295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417186-2.00010-8>.
- Musharrafieh, R., Tacchi, L., Trujeque, J., LaPatra, S. and Salinas, I. (2014). *Staphylococcus warneri*, a resident skin commensal of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with pathobiont characteristics. *Veterinary Microbiology*, 169(1-2), pp.80–88. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2013.12.012>.
- Navarrete, P., Espejo, R.T. and Romero, J. (2008). Molecular analysis of microbiota along the digestive tract of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Microbial Ecology*, 57(3), pp.550–561. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9448-x>.

- Navarrete, P., Magne, F., Mardones, P., Riveros, M., Opazo, R., Suau, A., Pochart, P. and Romero, J. (2010). Molecular analysis of intestinal microbiota of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *FEMS Microbiology Ecology*, 71(1), pp.148–156. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00769.x>.
- Navarrete, P., Magne, F., Arana, C., Fuentes, P., Barros, L., Opazo, R., Espejo, R. and Romero, J. (2012). PCR-TTGE Analysis of 16S rRNA from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) gut microbiota reveals host-specific communities of active bacteria. *PLoS One*, 7(2), p.e31335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031335>.
- Nayak, S.K. (2010). Role of gastrointestinal microbiota in fish. *Aquaculture Research*, 41(11), pp.1553–1573. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02546.x>.
- Ou, W., Yu, G., Zhang, Y. and Mai, K. (2021). Recent progress in the understanding of the gut microbiota of marine fishes. *Marine Life Science & Technology*, 3(4), pp.434–448. <https://doi.org/10.1007/s42995-021-00094-y>.
- Perry, W.B., Lindsay, E., Payne, C.J., Brodie, C. and Kazlauskaitė, R. (2020). The role of the gut microbiome in sustainable teleost aquaculture. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1926), p.20200184. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0184>.
- Reda, R.M., Selim, K.M., El-Sayed, H.M. and El-Hady, M.A. (2017). In vitro selection and identification of potential probiotics isolated from the gastrointestinal tract of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 10(4), pp.692–703. <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9314-6>.
- Rivas, A.J., Lemos, M.L. and Osorio, C.R. (2013). *Photobacterium damselae* subsp. *damselae*, a bacterium pathogenic for marine animals and humans. *Frontiers in Microbiology*, 4, pp.283–289. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00283>.
- Saitou, N. and Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), pp.406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>.
- Selim, K.M. and Reda, R.M. (2015). Improvement of immunity and disease resistance in the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, by dietary supplementation with *Bacillus amyloliquefaciens*. *Fish & Shellfish Immunology*, 44(2), pp.496–503. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.03.004>.
- Serra, C.R., Almeida, E.M., Guerreiro, I., Santos, R., Merrifield, D.L., Tavares, F., Oliveira, A. and Enes, P. (2019a). Selection of carbohydrate-active probiotics from the gut of carnivorous fish fed plant-based diets. *Scientific Reports*, 9(1), pp.1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42716-7>.
- Serra, C.R., Almeida, E.M., Guerreiro, I., Santos, R., Merrifield, D.L., Tavares, F., Oliveira, A. and Enes, P. (2019b). Selection of carbohydrate-active probiotics from the gut of carnivorous fish fed plant-based diets. *Scientific Reports*, 9(1), pp.1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42716-7>.
- Smruga, S., Sandin, S.A. and Azam, F. (2010). Abundance, diversity, and activity of microbial assemblages associated with coral reef fish guts and feces. *FEMS Microbiology Ecology*, 73(1), pp.31–42. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00879.x>.
- Sun, Y., Yang, H., Ling, Z., Chang, J. and Ye, J. (2009). Gut microbiota of fast and slow growing grouper *Epinephelus coioides*. *African Journal of Microbiology Research*, 3, pp.713–720. Available at: https://academicjournals.org/article/article1380369856_Yunzhang.pdf [Accessed 7 May 2025].
- Sun, Y.Z., Yang, H.L., Ma, R.L., Zhang, C.X. and Lin, W.Y. (2011). Effect of dietary administration of *Psychrobacter* sp. on the growth, feed utilization, digestive enzymes and immune responses of grouper *Epinephelus coioides*. *Aquaculture Nutrition*, 17(3), pp.733–740. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00837.x>.
- Suresh, K., Pillai, D., Soni, M., Rathlavath, S. and Narshivudu, D. (2024). *Micrococcus luteus*, an emerging opportunistic pathogen in farmed Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* in Andhra Pradesh, India. *Aquaculture International*, 33(51). <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01761-4>.
- Tamura, K. and Nei, M. (1993). Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Molecular Biology and Evolution*, 10(3). <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040023>.
- Tamura, K., Stecher, G. and Kumar, S. (2021). MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. *Molecular Biology And Evolution*, 38(7), pp.3022–3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>.
- Tapia-Paniagua, S.T., Vidal, S., Lobo, C., Prieto-Álamo, M.J., Jurado, J., Cordero, H., Cerzuela, R., García de la Banda, I., Esteban, M.A., Balebona, M.C. and Moriño, M.A. (2014). The treatment with the probiotic *Shewanella putrefaciens* Pdp11 of specimens of *Solea senegalensis* exposed to high stocking densities to enhance their resistance to disease. *Fish & Shellfish Immunology*, 41(2), pp.209–221. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2014.08.019>.
- Tortora, G., Funke, B.R. y Case, C.L. (2007). Introducción a la microbiología. Buenos Aires: Médica Panamericana, p.959.
- Wang, A.R., Ran, C., Ringø, E. and Zhou, Z.G. (2018). Progress in fish gastrointestinal microbiota research. *Reviews in Aquaculture*, 10(3), pp.626–640. <https://doi.org/10.1111/raq.12191>.
- Xiao Joe, J.T., Tseng, Y.-C., Wu, J.-L. and Lu, M.-W. (2021). The alteration of intestinal microbiota profile and immune response in *Epinephelus coioides* during pathogen infection. *Life*, 11(2), p.99. <https://doi.org/10.3390/life11020099>.
- Yarza, P., Yilmaz, P., Pruesse, E., Glöckner, F.O., Ludwig, W., Schleifer, K.-H., Whitman, W.B., Euzéby, J., Amann, R. and Rosselló-Móra, R. (2014). Uniting the classification of cultured and uncultured bacteria and archaea using 16S rRNA gene sequences. *Nature Reviews Microbiology*, 12(9), pp.635–645. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3330>.
- Zatán Valdiviezo, A.E., Castillo Chunga, D., Castañeda Vargas, A.E., Feria Zavallos, M.A., Toledo Valdiviezo, O.E., Aguilar Zavaleta, J.L., Cueva Távora, M.D. and Motte, E. (2020). Characterization of the intestinal microbiota in snook (*Centropomus* sp.) and isolation of potential probiotic bacteria. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(3), p.e16036. <https://doi.org/10.15381/rivp.v31i3.16036>.
- Zhang, B., Yang, H., Cai, G., Nie, Q. and Sun, Y. (2024). The interactions between the host immunity and intestinal microorganisms in fish. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(30), pp.1–14. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12934-1>.



ARTÍCULO / ARTICLE

Evaluación del potencial reproductivo de *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariales: Rhodophyta) en San Andrés, Pisco-Perú

Evaluation of the reproductive potential of *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariales: Rhodophyta) in San Andres, Pisco-Peru

Sofía Cielo Chung-Velásquez ^{1,2*}

0000-0002-5046-6971
100022205@cientifica.edu.pe

Paul M. Baltazar-Guerrero ^{1,2*}

0000-0003-4071-4772
pbaltazar@cientifica.edu.pe

Max S. Castañeda-Franco ²

0000-0003-2470-6879
mcastanedaf@cientifica.edu.pe

Arturo J. Mires-Reyes ²

0000-0001-9550-8912
amires@cientifica.edu.pe

1. Carrera de Biología Marina, Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima 15067, Perú. 100022205@cientifica.edu.pe

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*; mcastanedaf@cientifica.edu.pe, amires@cientifica.edu.pe

* Autor de correspondencia/Corresponding Author:

Recibido / Received: 06/10/2024

Aceptado / Accepted: 08/04/2025

Citación / Citation: Chung-Velásquez, S.C.; Baltazar-Guerrero, P.M.; Castañeda-Franco, M.S. 2025. Mires-Reyes, A.J. Evaluación del potencial reproductivo de *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariales: Rhodophyta) en San Andrés, Pisco-Perú. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 53-69

RESUMEN

Gracilariopsis lemaneiformis (conocida en Perú como "pelillo") es una macroalga roja de importancia económica. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial reproductivo (PR) de individuos de la especie extraídos en la playa San Andrés, Pisco-Perú a través de la técnica de liberación de esporas; para ello se tomaron muestras de la especie en zonas alejadas de la orilla (A, B y C) y se evaluó la liberación de esporas en condiciones de laboratorio. Los resultados de este estudio indican que las condiciones de orilla serían propicias para la madurez de estructuras reproductivas y liberación de esporas en esta especie, condicionadas por los parámetros fisicoquímicos del agua, resaltando entre ellos temperatura y salinidad. Se contabilizó en promedio 274.91 ± 1.52 cistocarpos g^{-1} , $137 359.78 \pm 2546.17$ esporas g^{-1} , y un potencial reproductivo de $154 097.94$ esporas g^{-1} . Se propone llevar a cabo más investigación que pueda complementar este trabajo para proponer planes de manejo.

Palabras clave: Macroalga roja, reproducción, esporulación, acuicultura, cultivo.

ABSTRACT

Gracilariopsis lemaneiformis (known in Perú as "pelillo") is a red seaweed of economic importance recognized for providing a wide variety of services. The aim of this work is to evaluate the reproductive potential (RP) of individuals of the species extracted from Playa San Andrés, Pisco-Peru through the spore release technique; for this purpose, samples of the species were taken in areas far from the shore (A, B and C) and spore release was evaluated under laboratory conditions. The results of this study indicate that the shore conditions would be favorable for the maturity of reproductive structures and spore release in this species, conditioned by water physicochemical parameters, highlighting temperature and salinity among them. An average of 274.91 ± 1.52 cystocarps g^{-1} , $14 950.08 \pm 271.13$ spores g^{-1} , and a reproductive potential of $154,097.94$ spores g^{-1} were counted. Further research can complement this work in order to propose management plans.

Key words: Red seaweed, reproduction, sporulation, aquaculture, cultivation.

INTRODUCCIÓN

Gracilariopsis lemaneiformis (Bory) E. Y. Dawson, Acleto & Foldvik, perteneciente al orden Gracilariales, conocida como “pelillo” en Perú, es una macroalga roja que se distribuye de manera natural en la costa pacífica de América del Sur. Forma parches que se extienden desde Paita, Perú (5°05'21" S, 81°06'51" O), hasta Antofagasta, Chile (23°39'08" S, 70°23'43" O). Se encuentra principalmente en la zona intermareal y sublitoral superior en litoral arenoso (Arakaki *et al.*, 2015). Al igual que otras rodófitas, presenta reproducción asexual (vegetativa) y sexual (gametofitos y esporofitos), sobre los cuales influyen diversos factores ambientales (Jiang *et al.*, 2018) que determinan la liberación y asentamiento de esporas en el medio natural delimitando así el área geográfica de la especie (Yang *et al.*, 2006; Bulboa *et al.*, 2008; Jiang *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2022).

Las especies del orden Gracilariales son de importancia económica a nivel mundial, debido a la presencia de polisacáridos de agar de alta calidad; metabolitos (como ficoeritrina, hemaglutinina, entre otros). Por esta razón son utilizados en productos farmacéuticos, cosméticos, agrícolas y nutraceuticos (Kain y Destombe, 1995; Mazumder *et al.*, 2002; Marin y Peña, 2011; Meinita *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2021). La mayor parte de la bibliografía disponible sobre *G. lemaneiformis* proviene de países asiáticos, especialmente de China, donde es considerado un recurso de interés comercial global (Zhou *et al.*, 2016). Esta macroalga es altamente apreciada, cultivada y estudiada, sobre todo por su potencial uso en la biorremediación, generando una cantidad significativa de información científica sobre su cultivo (Ye *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2022; Pang *et al.*, 2023). En Sudamérica, la mayor cantidad de información proviene de Chile y Perú, aunque en términos generales, ésta es escasa, dispersa y antigua, enfocada principalmente en describir su historia de vida, identificación taxonómica y cuantificación de la explotación de la macroalga (Santelices *et al.*, 1984; González *et al.*, 1996; Arakaki *et al.*, 2015).

En Perú, este recurso es extraído en grandes cantidades por pescadores artesanales directamente de poblaciones naturales, especialmente durante la temporada de primavera y verano, y vendida a empresas exportadoras (Castillo *et al.*, 1999; Arakaki *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2018). Esta actividad ha sido señalada como no sostenible y como causa de impacto negativo en el ecosistema (Avila-Peltroche y Padilla-Vallejos,

INTRODUCTION

Gracilariopsis lemaneiformis (Bory) E. Y. Dawson, Acleto & Foldvik, belonging to the order Gracilariales, known as “pelillo” in Peru, is a red seaweed that is naturally distributed along the Pacific coast of South America. It forms patches extending from Paita, Peru (5°05'21" S, 81°06'51" W), to Antofagasta, Chile (23°39'08" S, 70°23'43" W). It is found mainly in the intertidal and upper sublittoral zone on sandy shorelines (Arakaki *et al.*, 2015). Like other rhodophytes, it has asexual (vegetative) and sexual (gametophytes and sporophytes) reproduction, which is influenced by various environmental factors (Jiang *et al.*, 2018) that determine the release and settlement of spores in the natural environment, thus delimiting the geographical range of the species (Yang *et al.*, 2006; Bulboa *et al.*, 2008; Jiang *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2022).

Species of the order Gracilariales are of worldwide economic importance, due to the presence of high-quality agar polysaccharides; metabolites (such as phycoerythrin, hemagglutinin, among others). For this reason, they are used in pharmaceutical, cosmetic, agricultural and nutraceutical products (Kain y Destombe, 1995; Mazumder *et al.*, 2002; Marin and Peña, 2011; Meinita *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2021). Most of the available literature on *G. lemaneiformis* comes from Asian countries, especially from China, where it is considered a resource of global commercial interest (Zhou *et al.*, 2016). This seaweed is highly appreciated, cultivated and studied, especially for its potential use in bioremediation, generating a significant amount of scientific information on its cultivation (Ye *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2022; Pang *et al.*, 2023). In South America, most information comes from Chile and Peru, although in general terms, this is scarce, scattered and old, mainly focused on describing its life history, taxonomic identification and quantification of the exploitation of the seaweed (Santelices *et al.*, 1984; González *et al.*, 1996; Arakaki *et al.*, 2015).

In Peru, this resource is extracted in large quantities by artisanal fishermen directly from natural populations, especially during the spring and summer season, and sold to exporting companies (Castillo *et al.*, 1999; Arakaki *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2018). This activity has been reported as unsustainable and as a cause of negative impact on the ecosystem (Avila-Peltroche and Padilla-Vallejos, 2020; Yang *et al.*, 2021). Despite this,

2020; Yang *et al.*, 2021). A pesar de ello, el interés por la especie sigue en aumento, y la demanda no puede ser cubierta a través de la extracción directa, por lo que es necesaria información científica que permita implementar biotécnicas de cultivo para *G. lemaneiformis* (Wei *et al.*, 2021).

En la acuicultura, *G. lemaneiformis* es reconocida como especie propicia para el cultivo por su alta tasa de crecimiento (6.6% d⁻¹), rápido incremento de biomasa (20 veces más en 45 días), morfología ramificada para pronta cobertura de sedimentos, adaptación a variedad de condiciones ambientales (Gerard, 1988) como turbulencias marinas, rango de salinidad (20-35‰), temperatura (12-23°C) y desecación. Además, se ha descrito como una especie reproductiva durante todo el año (González-Leija *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2013a, 2016; Zhang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2022).

Actualmente, el método más común para el cultivo de la especie es a través del crecimiento de fragmentos vegetativos (reproducción asexual). Siendo una actividad exhaustiva y laboriosa, lo que hace que sea no óptima para producción a gran escala debido a su considerable demanda de tiempo, mano de obra, y un stock inicial elevado necesario para su implementación (Freitas *et al.*, 2021). Además, este método favorece una baja diversidad genética, haciéndola más propensa a enfermedades, fenómeno de creciente interés (Murúa *et al.*, 2024). Por otro lado, la alta demanda y su rápida comercialización a nivel mundial, no permite brindar el tiempo necesario a la especie para una recuperación óptima de las praderas naturales, lo que genera un impacto negativo en los ecosistemas locales (Cotas *et al.*, 2023).

Otro método utilizado para propagar especies de macroalgas es la técnica de liberación de esporas, también conocida como “esporocultivo”. Esta técnica presenta varias ventajas frente a la tradicional propagación vegetativa, dado que la liberación de esporas permite colonizar áreas de mayor tamaño con una menor cantidad de materia prima (esporas). También favorece la variabilidad genética, la cual brinda la oportunidad de mejorar o desarrollar características que sean de interés para los productores. Así mismo, permite proponer mejoras genéticas y crear nuevos bancos naturales (Romo, 1988; Ren *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2013b; Xiao *et al.*, 2022).

Esta técnica ha sido estudiada en especies del género *Gracilaria* para determinar si es viable para el cultivo (Umamaheswara,

interest in the species continues to grow, and the demand cannot be met through direct extraction, so scientific information is needed to implement biotechnical cultivation techniques for *G. lemaneiformis* (Wei *et al.*, 2021).

In aquaculture, *G. lemaneiformis* is recognized as a favorable species for culture because of its high growth rate (6.6% d⁻¹), fast biomass increase (20 times more in 45 days), branched morphology for prompt sediment cover, adaptation to a variety of environmental conditions (Gerard, 1988) such as marine turbulence, salinity range (20-35‰), temperature (12-23°C) and desiccation. In addition, it has been described as a year-round reproductive species (González-Leija *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2013a, 2016; Zhang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2022).

Currently, the most common method for the cultivation of the species is through the growth of vegetative fragments (asexual reproduction). It is an exhaustive and laborious activity, which makes it not optimal for large-scale production due to its considerable demand for time, labor, and a high initial stock required for its implementation (Freitas *et al.*, 2021). In addition, this method favors low genetic diversity, making it more prone to diseases, a phenomenon of growing interest (Murúa *et al.*, 2024). On the other hand, the high demand and its rapid commercialization worldwide does not allow the species the necessary time for an optimal recovery of the natural beds, which generates a negative impact on local ecosystems (Cotas *et al.*, 2023).

Another method used to propagate seaweed species is the spore release technique, also known as “spore cultivation”. This technique has several advantages over traditional vegetative propagation, since the release of spores makes it possible to colonize larger areas with a smaller amount of raw material (spores). It also favors genetic variability, which provides the opportunity to improve or develop traits that are of interest to producers. It also makes it possible to propose genetic improvements and create new natural banks (Romo, 1988; Ren *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2013b; Xiao *et al.*, 2022).

This technique has been studied on species of the genus *Gracilaria* to determine if it is viable for cultivation (Umamaheswara, 1976; Umamaheswara and Subbarangaiah, 1981; Halling *et al.*, 2005). Alveal *et al.* (1997) cultivated *G. chilensis* from cystocarp

1976; Umamaheswara y Subbarangaiah, 1981; Halling *et al.*, 2005). Alveal *et al.* (1997) cultivaron *G. chilensis* a partir de individuos cistocárpicos para evaluar e incentivar el método de manejo de la especie a través de la técnica de liberación de esporas, destacando que a partir de 200 g del alga se podía obtener densidades de 400 esporas cm^{-2} , y concluyendo que estas cantidades son viables para el manejo de granjas comerciales en colaboración con cooperativas de pescadores. Glenn *et al.* (1996) aplicó el método con *Gracilaria parvispora*, que mantuvo liberando carposporas por 42 horas sobre cuerdas de nylon obteniendo densidades de 1810 esporas cm^{-2} , destacando que la cosecha que se obtuvo podía ser entregada a las comunidades costeras para su posterior siembra, mientras una pequeña parte podía ser usada para producir nuevas esporas para el manejo de futuras generaciones. Lideman *et al.* (2019) aplicó la técnica usando distintos medios de cultivo para obtener la mayor cantidad de carposporas posibles por día, obteniendo como máximo número de esporas liberadas por cistocarpo 2351 en el segundo día en medio SSW, concluyendo que el método podría aplicarse para promover la producción de semillas de la macroalga. Así, la técnica del “esporocultivo” ha sido estudiada en especies del género *Gracilaria*, pero ha sido poca difundida para el “pelillo” en Perú (Hayashi *et al.*, 2013).

El esporocultivo, junto con el cultivo vegetativo, representa una herramienta clave para optimizar la producción de *G. lemaneiformis* en Perú. Sin embargo, existe un vacío de información sobre el potencial reproductivo de las esporas de esta especie, lo que limita su aplicación. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar dicho potencial en individuos extraídos de la playa San Andrés, Pisco-Perú, donde se encuentra uno de los parches representativos de la especie en el país. A través de esta evaluación, se busca determinar si la técnica de liberación de esporas en esta región podría ofrecer resultados viables para el desarrollo de un plan de cultivo que garantice su disponibilidad de manera sostenible.

METODOLOGÍA

Recolección y procesamiento de las muestras

La colecta de individuos de *G. lemaneiformis* se llevó a cabo entre noviembre del 2021 y enero del 2022, en trabajo conjunto con pescadores de la Cooperativa de Trabajadores Pesqueros

individuos a evaluar y encouraging the management method of the species through the spore release technique, highlighting that from 200 g of seaweed, densities of 400 spores cm^{-2} could be obtained, and concluding that these quantities are viable for the management of commercial farms in collaboration with fishermen's cooperatives. Glenn *et al.* (1996) applied the method with *Gracilaria parvispora*, which kept releasing carpospores for 42 hours on nylon ropes, obtaining densities of 1810 spores cm^{-2} , emphasizing that the harvest obtained could be given to coastal communities for subsequent planting, while a small part could be used to produce new spores for the management of future generations. Lideman *et al.* (2019) applied the technique using different culture media to obtain as many carpospores as possible per day, obtaining 2351 as the maximum number of spores released per cystocarps on the second day in SSW medium, concluding that the method could be applied to promote seed production of the seaweed. Thus, the “spore cultivation” technique has been studied in species of the genus *Gracilaria*, but has been little disseminated for “pelillo” in Peru (Hayashi *et al.*, 2013).

Spore cultivation, together with vegetative cultivation, represents a key tool to optimize the production of *G. lemaneiformis* in Peru. However, there is a lack of information on the reproductive potential of the spores of this species, which limits its application. Therefore, the objective of this study was to evaluate this potential in individuals extracted from San Andres beach, Pisco-Peru, where one of the representative patches of the species in the country is located. Through this evaluation, we seek to determine if the spore release technique in this region could offer viable results for the development of a cultivation plan that guarantees its availability in a sustainable manner.

METHODOLOGY

Sample collection and processing

The collection of individuals of *G. lemaneiformis* was carried out between November 2021 and January 2022, working together with fishermen from the Cooperativa de Trabajadores Pesqueros Artesanales Algas Marinas (COTRAPALMAR). Samples were randomly collected at 25 points on San Andrés beach, characterized as a shallow beach with an extended intertidal zone (13°42' 57.39" S, 76°13' 16.30" W) (Figure 1). The individuals

Artesanales Algas Marinas (Cotrapalmar). Se colectaron muestras de manera aleatoria en 25 puntos en playa San Andrés, caracterizada por ser poco profunda con una zona intermareal extendida ($13^{\circ}42'57.39''$ S, $76^{\circ}13'16.30''$ O) (Figura 1). Los individuos seleccionados fueron aquellos que preferentemente presentaron la fase cistocárpica, para delimitar el trabajo y los objetivos propuestos.

Los puntos de muestreo aleatorio (25) fueron enumerados y clasificados por su distancia a la orilla. De esta manera, obtuvimos: puntos cercanos a la orilla, 0 – 5 m “Zona A” (estación 1- 8), medianamente cercanos a la orilla, 5 – 20 m “Zona B” (estación 9 – 16), y alejados de la orilla, 20 – 50 m “Zona C” (estación 17- 25) (Figura 1).

selected were those that preferably presented the cystocarp phase, in order to delimit the work and the proposed objectives.

Random sampling points (25) were numbered and ranked by distance from shore. In this way, we obtained: points close to the shore, 0 - 5 m “Zone A” (station 1- 8), moderately close to the shore, 5 - 20 m “Zone B” (station 9 - 16), and far from the shore, 20 - 50 m “Zone C” (station 17- 25) (Figure 1).



Figura 1. Mapa de Playa San Andrés, Pisco, mostrando su ubicación en Perú, y los 25 puntos de muestreo de colecta de *Gracilariopsis lemaneiformis* divididos en 3 zonas: A, B y C.

Figure 1. Map of San Andres beach, Pisco, showing its location in Peru and the 25 sampling points for collecting *Gracilariopsis lemaneiformis* divided into 3 zones: A, B and C.

En cada punto donde se realizó el muestreo se tomaron parámetros fisicoquímicos de temperatura ($^{\circ}$ C), salinidad (UPS), pH, y oxígeno disuelto (O_2), con un equipo multiparámetro marca YSI modelo Professional PLUS (Yellow Springs, Ohio, EE. UU). Cada punto fue georreferenciado con un GPS marca GARMIN

At each sampling point, physicochemical parameters of temperature ($^{\circ}$ C), salinity (UPS), pH, and dissolved oxygen (O_2) were measured with a YSI Professional PLUS multiparameter equipment (Yellow Springs, Ohio, USA). Each point was georeferenced with a GARMIN GPS model MAP64S

modelo MAP64S (Georgetown, Islas Caimán).

Las muestras fueron colocadas en bolsas Ziploc y trasladadas al laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA) de la Universidad Científica del Sur, sede Pisco. Una vez en las instalaciones del LICMA, las muestras fueron separadas de otras macroalgas, lavadas primero con abundante agua destilada y luego con agua de mar filtrada para eliminar todo epifito y gránulos de arena presente en la macroalga. Finalmente se separaron las algas según la presencia o no de estructuras reproductivas (cistocarpos) (Figura 2A, 2B).

(Georgetown, Cayman Islands).

The samples were placed in Ziploc bags and transferred to the Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA) of the Universidad Científica del Sur, Pisco. Once at the LICMA facilities, the samples were separated from other seaweeds, washed first with abundant distilled water and then with filtered seawater to remove any epiphytes and sand granules present in the seaweed. Finally, fronds were separated according to the presence or absence of reproductive structures (cystocarps) (Figure 2A, 2B).

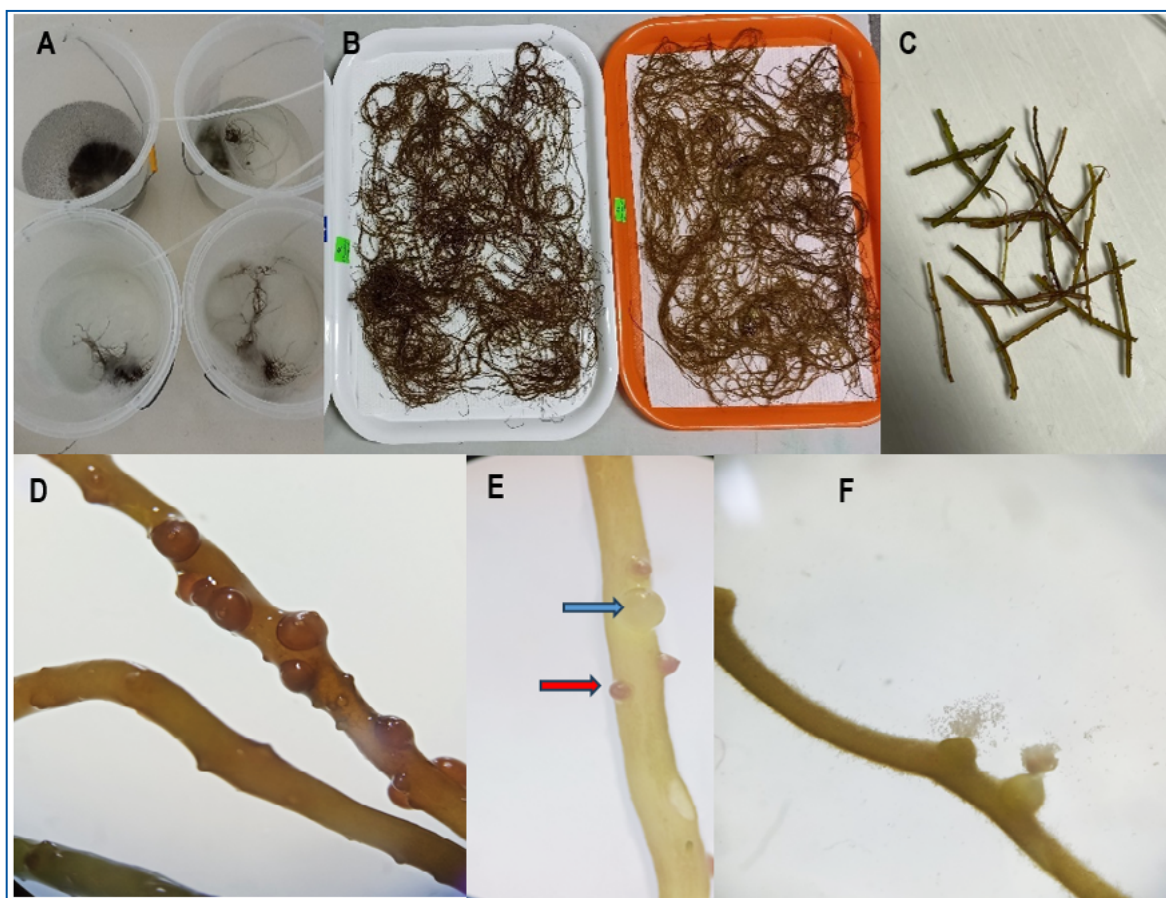


Figura 2. Procesos experimentales en *Gracilariopsis lemaneiformis*: (A) Baldes utilizados para el transporte de muestras. (B) Individuos con estructuras reproductivas, separados en bandejas para la limpieza de epífitos. (C) Trozos de 2 cm empleados para el control de peso y biomasa. (D) Observación de cistocarpos maduros bajo estereoscopio. (E) Cistocarpos inmaduros (flecha roja) y en maduración (flecha azul) vistos al estereoscopio. (F) Liberación de esporas, vista al estereoscopio.

Determinación del potencial reproductivo

Las frondas cistocárpicas obtenidas de cada punto muestreado fueron uniformizadas segmentándose en pequeños trozos (2 cm), y pesadas en una balanza analítica AE-Adam SAB 125I (Adam Equipment Ltd, Kingston, Reino Unido) para luego proceder a

Figure 2. Experimental processes in *Gracilariopsis lemaneiformis*: (A) Buckets used for sample transportation. (B) Individuals with reproductive structures, separated in trays for epiphyte cleaning. (C) 2 cm pieces used for weight and biomass control. (D) Observation of mature cystocarps under stereoscope. (E) Immature (red arrow) and maturing (blue arrow) cystocarps viewed under the stereoscope. (F) Spore release, seen under the stereoscope.

Determination of reproductive potential

The cystocarp fronds obtained from each sampled point were uniformized by segmenting them into small pieces (2 cm), and weighed on an AE-Adam SAB 125I analytical scale (Adam Equipment Ltd, Kingston, United Kingdom) to then proceed to

agruparlas hasta alcanzar una biomasa de 0.10 g, que serían consideradas como réplicas (Figura 2C, 2D); se obtuvo nueve réplicas por cada una de las 25 zonas, analizando en total 225 muestras.

Posteriormente, se procedió a someterlas a “estrés por desecación”, manteniendo los ejemplares trozados expuestos al aire y a temperatura ambiente en condiciones de laboratorio durante 3h, a fin de inducir la liberación de esporas (Infante y Candia, 1988; Wang *et al.*, 2010). Al finalizar el tiempo de desecación, cada una de las réplicas se colocaron en viales con 5 mL de agua de mar durante tres horas para rehidratarlas. Pasado dicho tiempo, se procedió a fijar las esporas liberadas en los viales, aplicando tres gotas de Lugol en cada vial.

Finalmente, se contabilizó el número de cistocarpos, y las esporas obtenidas por mililitro (esporas mL⁻¹). El conteo se llevó a cabo empleando una cámara de recuento Sedgewick Rafter según McAlice (1971), así mismo se determinó el potencial reproductivo según Arbaiza (2016):

group them until reaching a biomass of 0.10 g, which would be considered as replicates (Figure 2C, 2D); 9 replicates were obtained for each of the 25 zones, analyzing a total of 225 samples.

Subsequently, they were subjected to “desiccation stress”, keeping the cut specimens exposed to air and room temperature under laboratory conditions for 3h, in order to induce the spore release (Infante and Candia, 1988; Wang *et al.*, 2010). At the end of the drying time, each of the replicates were placed in vials with 5 mL of seawater for three hours to rehydrate them. After this time, the released spores were fixated in the vials by applying 3 drops of Lugol's solution to each vial.

Finally, the number of cystocarps and spores obtained per milliliter (spores mL⁻¹) were counted. Counting was carried out using a Sedgewick Rafter counting chamber according to McAlice (1971), and reproductive potential was determined according to Arbaiza (2016):

$\frac{\text{Esporas}}{\text{mL}} (n) = \frac{\text{Esporas contadas} \times 1000}{\text{Celdas}}$	$\frac{\text{Spores}}{\text{mL}} (n) = \frac{\text{Counted spores} \times 1000}{\text{Cells}}$
$\frac{\text{Esporas}}{\text{Litro}} (N) = \frac{n \times v \times 1000}{V}$	$\frac{\text{Spores}}{\text{Liter}} (N) = \frac{n \times v \times 1000}{V}$
$\text{Potencial Reproductivo (PR)} = \frac{\#\text{cistocarpos}}{g} \times \left(\frac{\text{Esp}}{\text{cistocarpos}} \right) \times W_i$	$\text{Reproductive potential (RP)} = \frac{\#\text{cystocarps}}{g} \times \left(\frac{\text{Spores}}{\text{cystocarps}} \right) \times W_i$

Donde:

n = número de media de esporas en 1mL de muestra de agua

v = volumen de concentrado de muestra de agua (mL)

V = volumen de agua total (litros)

Wi = Peso de individuo algal (g)

Where:

n = average number of spores in 1mL of water sample

v = volume of water sample concentrate (mL)

V = total water volume (liters)

Wi = Weight of algal individual (g)

Identificación de estado de madurez de estructuras reproductivas

Paralelamente a la obtención de esporas, se realizó la descripción de los cistocarpos empleando un microscopio Leica DM500 y estereoscopio marca Leica Modelo S Apo Stereozoom (Leica, Wetzlar, Alemania), analizando el tamaño para identificar y describir los estados de madurez (maduro, inmaduro, en maduración) de estos, y el número de cistocarpos respecto a una biomasa determinada (Marín-Salgado and Peña-Salamanca, 2011). Se clasificó los cistocarpos en maduración a aquellos que presentaron una forma circular globosa, como

Identification of the maturity stage of reproductive structures

Parallel to the spore collection, the cystocarps were described using a Leica DM500 microscope and a Leica Model S Apo Stereozoom (Leica, Wetzlar, Germany), analyzing their size to identify and describe the stages of maturity (mature, immature, maturing) and the number of cystocarps with respect to a given biomass (Marín-Salgado and Peña-Salamanca, 2011).

The cystocarps were classified as maturing to those that presented a globular circular shape, as mature to those with a well-defined globular shape and turgid, prone to release spores at

maduros a aquellos con forma globosa bien definida y turgentes, propensos a liberar las esporas en el momento apropiado, y a los cistocarpos inmaduros a aquellos que presentaron forma circular irregular de tamaño pequeño a forma de protuberancias sobre la macroalga (Figura 4).

Análisis de datos estadístico

Para evaluar el potencial reproductivo (PR), número de cistocarpos g^{-1} y número de esporas por cistocarpo de *G. lemaneiformis* según la zona de muestreo, se ajustó un modelo lineal generalizado con una distribución de error binomial negativa (GLM.nb). Esta aproximación permitió manejar la sobredispersión presente en los datos y proporcionar estimaciones más robustas de la relación entre los valores relacionados con el potencial reproductivo del alga y las características de cada zona de muestreo (Zona A, B y C).

Para analizar la influencia de los parámetros fisicoquímicos en el (PR), número de cistocarpos g^{-1} y número de esporas por cistocarpo de *G. lemaneiformis*, se emplearon Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM) con una distribución de error binomial. En estos modelos, la temperatura, la salinidad, el pH y el oxígeno disuelto se incluyeron como efectos fijos, mientras que la zona de muestreo se incorporó como un efecto aleatorio para considerar la variabilidad espacial.

Finalmente, para evaluar si las proporciones de la madurez de cistocarpos de *G. lemaneiformis* difieren entre las tres zonas de muestreo se realizó una prueba de Chi-cuadrado. En los análisis de los valores reproductivos (número de cistocarpos g^{-1} y número de esporas por cistocarpo) se utilizó la prueba de Diferencia Honestamente Significativa de Tukey (HSD) para realizar comparaciones múltiples y determinar diferencias significativas según la zona de muestreo. El análisis de la información se llevó a cabo con el uso del programa RStudio v4.3.2 para los datos mediante la función `glm.nb()` del paquete MASS, y la función `glmer()` del paquete lme4. Los gráficos presentes en este estudio se realizaron empleando el programa de Excel 2016.

the appropriate time, and immature cystocarps to those that presented an irregular circular shape of small size to protrusions on the macroalgae (Figure 4).

Statistical data analysis

To evaluate the reproductive potential (RP), number of cystocarps g^{-1} and number of spores per cystocarp of *G. lemaneiformis* according to sampling area, a generalized linear model with a negative binomial error distribution (GLM.nb) was fitted. This approach allowed to handle the overdispersion present in the data and to provide more robust estimates of the relationship between the values related to the reproductive potential of the algae and the characteristics of each sampling zone (Zone A, Zone B and Zone C).

To analyze the influence of physicochemical parameters on the (PR), number of cystocarps g^{-1} and number of spores per cystocarp of *G. lemaneiformis*, Generalized Linear Mixed Models (GLMM) with a binomial error distribution were used. In these models, temperature, salinity, pH and dissolved oxygen were included as fixed effects, while sampling area was incorporated as a random effect to account for spatial variability.

Finally, to assess whether the maturity proportions of cystocarps of *G. lemaneiformis* differed among the three sampling areas, a Chi-square test was performed. In the analysis of reproductive values (number of cystocarps g^{-1} and number of spores per cystocarp), Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test was used to perform multiple comparisons and determine significant differences according to the sampling area. Data analysis was carried out using the RStudio v4.3.2 software for data using the `glm.nb()` function of the MASS package and the `glmer()` function of the lme4 package. The graphs presented in this study were made using Excel 2016.

RESULTADOS

Potencial Reproductivo

El análisis mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa (GLM.nb) mostró diferencias significativas en el potencial reproductivo (PR) de *G. lemaneiformis* entre las tres zonas de muestreo ($\chi^2 = 1422.35$, $gl = 2$, $p < 0.001$). La Zona A presentó el mayor PR ($216,336 \pm 4,655$ esporas g^{-1}), por lo que se utilizó como referencia para las comparaciones. En la Zona B, el PR disminuyó significativamente en comparación con la Zona A ($181,205 \pm 3,855$ esporas g^{-1} ; $p = 0.002$), mientras que en la Zona C se registró el valor más bajo ($64,753 \pm 12,655$ esporas g^{-1} ; $p < 0.001$). La evaluación del ajuste del modelo indicó que la distribución binomial negativa fue más adecuada que un modelo binomial estándar (AIC = 230.2 vs. 250.4, $\Delta AIC = -20.2$), lo que confirma la presencia de sobredispersión en los datos.

El análisis reveló diferencias significativas en el número de cistocarpos por gramo (g^{-1}) de *G. lemaneiformis* entre las tres zonas de muestreo ($\chi^2 = 122.8$, $gl = 2$, $p < 0.001$). En promedio, la Zona A presentó la mayor cantidad de cistocarpos (391.94 ± 6.45 g^{-1}), seguida por la Zona B, donde se observó una reducción moderada (279.44 ± 4.28 g^{-1}), y la Zona C, que registró el menor número (153.33 ± 3.15 g^{-1}) (Figura 3A).

Asimismo, el número de esporas por cistocarpio mostró variaciones significativas entre las zonas de estudio ($\chi^2 = 518.16$, $gl = 2$, $p < 0.001$). La B presentó el mayor promedio (648.4 ± 116.02), seguida por la A (552.0 ± 98.35), mientras que la Zona C registró la menor cantidad de esporas por cistocarpio (422.3 ± 147) (Figura 3B).

RESULTS

Reproductive Potential

Analysis using a generalized linear model with negative binomial distribution (GLM.nb) showed significant differences in the reproductive potential (RP) of *Gracilariopsis lemaneiformis* among the three sampling areas ($\chi^2 = 1422.35$, $gl = 2$, $p < 0.001$). Zone A presented the highest PR ($216,336 \pm 4,655$ spores g^{-1}), so it was used as a reference for comparisons. In Zone B, the PR decreased significantly compared to Zone A ($181,205 \pm 3,855$ spores g^{-1} ; $p = 0.002$), while the lowest value was recorded in Zone C ($64,753 \pm 12,655$ spores g^{-1} ; $p < 0.001$). Evaluation of the model fit indicated that the negative binomial distribution was more appropriate than a standard binomial model (AIC = 230.2 vs. 250.4, $\Delta AIC = -20.2$), confirming the presence of overdispersion in the data.

The analysis revealed significant differences in the number of cystocarps per gram (g^{-1}) of *G. lemaneiformis* among the three sampling areas ($\chi^2 = 122.8$, $gl = 2$, $p < 0.001$). On average, Zone A presented the highest number of cystocarps (391.94 ± 6.45 g^{-1}), followed by Zone B, where a moderate reduction was observed (279.44 ± 4.28 g^{-1}), and Zone C, which registered the lowest number (153.33 ± 3.15 g^{-1}) (Figure 3A).

Likewise, the number of spores per cystocarp showed significant variations between study areas ($\chi^2 = 518.16$, $gl = 2$, $p < 0.001$). Zone B presented the highest average (648.4 ± 116.02), followed by Zone A (552.0 ± 98.35), while Zone C recorded the lowest number of spores per cystocarp (422.3 ± 147) (Figure 3B).

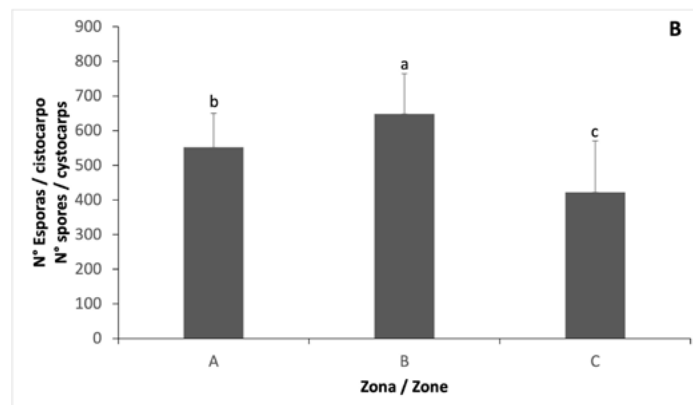


Figura 3. Valores reproductivos de *G. lemaneiformis* encontrados por zona. A: Número de cistocarpos por gramo. B: Número de esporas por cistocarpio. Diferentes letras indican diferencias significativas según Test HSD de Tukey ($p < 0.001$).

Figure 3. Reproductive values of *G. lemaneiformis* found by zone A: Number of cystocarps per gram. B: Number of spores per cystocarp. Different letters indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p < 0.001$).

Análisis de parámetros fisicoquímicos

El análisis mediante un modelo lineal mixto generalizado (GLMM), considerando la zona de muestreo como efecto aleatorio, mostró que la temperatura y la salinidad tuvieron un impacto significativo en el potencial reproductivo (PR) de *G. lemaneiformis*, mientras que el oxígeno disuelto presentó un efecto menor pero también significativo, y el pH no mostró una influencia estadísticamente relevante. En detalle, la temperatura ($p < 0.001$) y la salinidad ($p = 0.006$) se asociaron positivamente con el aumento del PR. Aunque el oxígeno disuelto (OD) también tuvo un efecto significativo ($p = 0.040$), su impacto fue menor en comparación con los otros dos factores, lo que sugiere una posible influencia en el PR, pero con menor peso relativo. En contraste, el pH no mostró un efecto significativo ($p = 0.844$), indicando que este parámetro no influye de manera relevante en las condiciones evaluadas. La inclusión de la zona de muestreo como efecto aleatorio mejoró el ajuste del modelo ($AIC = 310.2$), permitiendo explicar mejor la variabilidad en los datos.

Análisis de la madurez de cistocarpos

Los resultados de la prueba de Chi-cuadrado ($\chi^2=25.8$, $gl = 2$, $p = 0.001$) indicaron diferencias significativas en la distribución de las fases de la macroalga entre las zonas de muestreo. El análisis post hoc reveló que la Zona A presentó una proporción significativamente diferente de fases en comparación con la Zona B ($p=0.002$) y la Zona C ($p=0.004$). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre la Zona B y la Zona C ($p=0.250$). El mayor porcentaje de cistocarpos maduros se encontró en la zona A (50%), seguido del B (41%) y C (37%); la cantidad de cistocarpos en maduración fue más alto en A, C y menor en B, y el mayor valor de cistocarpos inmaduros se

Analysis of physicochemical parameters

Analysis using a generalized linear mixed model (GLMM), considering sampling area as a random effect, showed that temperature and salinity had a significant impact on the reproductive potential (RP) of *G. lemaneiformis*, while dissolved oxygen had a smaller but also significant effect, and pH did not show a statistically significant influence. In detail, temperature ($p < 0.001$) and salinity ($p = 0.006$) were positively associated with increased RP. Although dissolved oxygen (DO) also had a significant effect ($p = 0.040$), its impact was smaller compared to the other two factors, suggesting a possible influence on the RP, but with less relative influence. In contrast, pH did not show a significant effect ($p = 0.844$), indicating that this parameter does not have a relevant influence on the conditions evaluated. The inclusion of the sampling area as a random effect improved the model fit ($AIC = 310.2$), allowing to better explain the variability in the data.

Analysis of the maturity of cystocarps

The results of the Chi-square test ($\chi^2=25.8$, $gl = 2$, $p = 0.001$) indicated significant differences in the distribution of the seaweed phases between sampling areas. Post hoc analysis revealed that Zone A had a significantly different proportion of phases compared to Zone B ($p=0.002$) and Zone C ($p=0.004$). However, no significant differences were found between Zone B and Zone C ($p=0.250$). The highest percentage of mature cystocarps was found in zone A (50%), followed by B (41%) and C (37%); the highest number of maturing cystocarps was found in A, C and the lowest in B, and the highest value of immature cystocarps were located in B, C; and lowest in A (Figure 4).

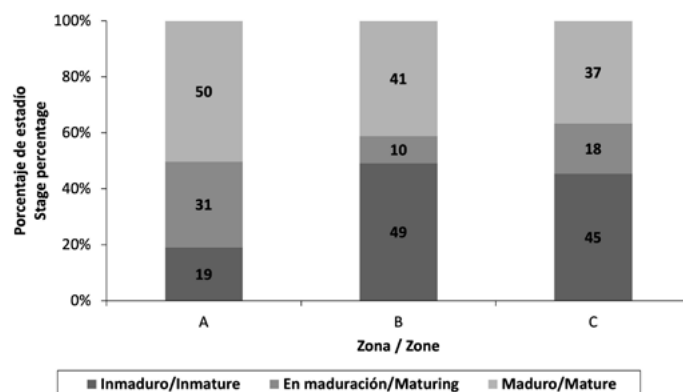


Figura 4. Porcentaje de estadios de madurez sexual de los cistocarpos por zonas de *Gracilariopsis lemaneiformis* en playa San Andrés, Pisco-Ica.

Figure 4. Percentage of sexual maturity stages of cystocarps by zone of *Gracilariopsis lemaneiformis* at San Andrés beach, Pisco, Ica

podieron ubicar en B, C; y menor en A (Figura 4).

DISCUSIÓN

G. lemaneiformis es una especie de alto valor económico y ampliamente cultivada en Asia, especialmente en China, Corea y Japón. Aunque la información en ese continente es extensa y valiosa (Ye *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2022; Pang *et al.*, 2023), es importante considerar que las condiciones fisicoquímicas de la costa peruana difieren significativamente. Por ello, los estudios realizados en América del Sur resultan más adecuados para comprender la respuesta de esta macroalga a las condiciones ambientales locales y optimizar su cultivo en la región.

Este trabajo es el primero que se realiza en el Perú para evaluar el potencial reproductivo de *G. lemaneiformis*, enfocándonos en la liberación de esporas y evaluación de las estructuras reproductivas, así como en los parámetros ambientales y como estos podrían influir en la maduración y producción de esporas. Los únicos estudios previos sobre el cultivo de *G. lemaneiformis* en Perú son los de Cisneros *et al.* (1997) y Castillo *et al.* (1999). El primero, realizado en San Bartolo, Lima, empleó la técnica de crecimiento vegetativo para evaluar el incremento de biomasa en diferentes estaciones del año. El segundo, llevado a cabo en la caleta de Chérrepe (Región Lambayeque), exploró diversos métodos de cultivo vegetativo, como el uso de mangas plásticas ("chululos"), cuerdas suspendidas y líneas flotantes, evidenciándose diferencias en el desarrollo según la técnica empleada.

En este estudio se evidenció una clara diferenciación entre las tres zonas para cada uno de los parámetros evaluados (potencial reproductivo, nivel de madurez de cistocarpos, y número de cistocarpos g⁻¹). Esta variabilidad podría estar relacionado con las diferencias en las condiciones ambientales de las zonas A, B y C, donde se recolectaron las muestras de *G. lemaneiformis*.

Liu *et al.* (2017) señalaron que temperaturas superiores a 25 °C incrementan significativamente la producción de tetraesporas en esta especie. En este estudio, la zona A, que registró la mayor temperatura (24 °C), también presentó el mayor número de carposporas. Esta área, caracterizada por su menor profundidad (~40 cm), y que se vería favorecida por el aumento y la mantención uniforme de la alta temperatura a la que está expuesta en comparación con las otras zonas, sobre todo en

DISCUSSION

G. lemaneiformis is a species of high economic value and widely cultivated in Asia, especially in China, Korea and Japan. Although the information on that continent is extensive and valuable (Ye *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2022; Pang *et al.*, 2023), it is important to consider that the physicochemical conditions of the Peruvian coast differ significantly. Therefore, studies conducted in South America are more appropriate to understand the response of this seaweed to local environmental conditions and to optimize its cultivation in the region.

This work is the first to be carried out in Peru to evaluate the reproductive potential of *G. lemaneiformis*, focusing on spore release and evaluation of reproductive structures, as well as on environmental parameters and how they might influence spore maturation and production. The only previous studies on the cultivation of *G. lemaneiformis* in Peru are those of Cisneros *et al.* (1997) and Castillo *et al.* (1999). The first, carried out in San Bartolo, Lima, used the vegetative growth technique to evaluate the increase in biomass in different seasons of the year. The second, carried out in the cove of Chérrepe (Lambayeque Region), explored various methods of vegetative culture, such as the use of plastic sleeves ("chululos"), suspended ropes and floating lines, showing differences in development according to the technique used.

This study showed a clear differentiation between the 3 zones for each of the parameters evaluated (reproductive potential, level of cystocarp maturity, and number of cystocarps g⁻¹). This variability could be related to differences in environmental conditions in zones A, B and C, where the *G. lemaneiformis* samples were collected.

Liu *et al.* (2017) noted that temperatures above 25 °C significantly increase tetraspore production in this species. In our study, zone A, which recorded the highest temperature (24 °C), also had the highest number of carpospores. This area, characterized by its shallower depth (~40 cm), and which would be favored by the increase and uniform maintenance of the high temperature to which it is exposed compared to the other zones, especially in summer. Studies such as those by Buschmann (1996) and Bellorin & Lemus (1997) would support this statement, since they point out that shallow depth plays a crucial role in the development, growth and reproduction of photosynthetic organisms

verano. Estudios como los de [Buschmann \(1996\)](#) y [Bellorín & Lemus \(1997\)](#) darían soporte a dicha afirmación, ya que señalan que la poca profundidad cumple un rol crucial en el desarrollo, crecimiento y reproducción de organismo fotosintéticos tales como las macroalgas, al favorecer la disponibilidad de la luz y condiciones estables como movimiento de agua y entrada de nutrientes. En esta zona, A, no solo se contabilizó el mayor número de esporas si no también individuos con elevado número de cistocarpos, un potencial reproductivo más alto, y un mayor número de estructuras reproductivas maduras, por lo que podríamos sugerir que estas condiciones están favoreciendo dichas características en los individuos macroalgales de *G. lemaiformis*.

[Li et al. \(2023\)](#) demostraron que no solo el crecimiento de los individuos se veía beneficiado con la presencia y disponibilidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), si no que estos también influían directamente en la producción de tetraesporas. En este estudio, los individuos con mayor producción de esporas se encontraron en la zona A, que recibe la influencia directa de efluentes del río Pisco. Según antecedentes previos, estos efluentes podrían contener una alta carga de nutrientes provenientes de fertilizantes agrícolas, así como contaminación asociada ([Solís e Inca, 2000](#); [Campos et al., 2017](#); [Olivares, 2022](#); [Barrera, 2024](#)), lo que podría haber afectado a los individuos más cercanos a la costa. Además, la proximidad de la zona de estudio al río Pisco y al humedal de San Andrés ha sido señalada como un factor que facilita filtraciones en las áreas adyacentes, lo que provocaría una disminución en la salinidad, fenómeno también evidenciado en la zona A. Esta reducción de salinidad podría haber tenido un efecto positivo en los individuos algales, reflejado en la mayor cantidad de esporas y cistocarpos observada en esta zona.

[Guzmán-Urióstegui y Robledo \(1999\)](#) probaron distintas condiciones de iluminación durante la liberación de esporas de *Gracilaria cornea*, y lograron obtener su mejor resultado con 8h de iluminación y temperatura de 26°C, aproximadamente 9000 carposporas por cistocarpio, muy superior a lo encontrado en el presente trabajo (648.4 ± 116.02 esporas/cistocarpio, para la zona B). [Michetti et al. \(2013\)](#) lograron conseguir 2000 carposporas por cistocarpio como pico de liberación en *Gracilaria gracilis* al aplicar y comparar distintas metodologías de esporulación, como descarga espontánea, shock osmótico, y desecación parcial, afirmando que estas metodologías podrían alternarse

such as seaweeds, by favoring the availability of light and stable conditions such as water movement and nutrient input. In this zone, A, not only was the highest number of spores recorded, but also individuals with a high number of cystocarps, a higher reproductive potential, and a greater number of mature reproductive structures, so we could suggest that these conditions are favoring these characteristics in the macroalgal individuals of *G. lemaiformis*.

[Li et al. \(2023\)](#) demonstrated that not only the growth of individuals benefited from the presence and availability of nutrients (nitrogen and phosphorus), but that these also directly influenced the production of tetraspores. In this study, the individuals with the highest spore production were found in zone A, which is directly influenced by effluents from the Pisco River. According to previous precedents, these effluents could contain a high load of nutrients from agricultural fertilizers, as well as associated pollution ([Solís and Inca, 2000](#); [Campos et al., 2017](#); [Olivares, 2022](#); [Barrera, 2024](#)), which could have affected individuals closer to the coast. In addition, the proximity of the study area to the Pisco River and the San Andrés wetland has been pointed out as a factor that facilitates leaks in adjacent areas, which would cause a decrease in salinity, a phenomenon also evidenced in zone A. This reduction in salinity could have had a positive effect on the algal individuals, reflected in the greater number of spores and cystocarps observed in this area.

[Guzmán-Urióstegui and Robledo \(1999\)](#) tested different illumination conditions during the release of *Gracilaria cornea* spores, and obtained their best result with 8h of illumination and a temperature of 26°C, approximately 9000 carpospores per cystocarp, much higher than that found in the present work (648.4 ± 116.02 spores/ cystocarp, for zone B). [Michetti et al. \(2013\)](#) succeeded in achieving 2000 carpospores per cystocarp as peak release in *Gracilaria gracilis* by applying and comparing different sporulation methodologies, such as spontaneous discharge, osmotic shock, and partial desiccation, stating that these methodologies could be alternated depending on the intention of the culture. The individuals used in this work were collected from the environment in the summer season, characterized by long periods of light (13h of light:11h of darkness), which contrasts with the high number of individuals with reproductive structures (cystocarps) which had already been generated from previous seasons with short photoperiods (winter, spring). A collection in other seasons of the year

dependiendo de la intención del cultivo. Los individuos usados en este trabajo fueron recolectados del ambiente, en época de verano, caracterizado por largos periodos de luz (13h de luz:11h de oscuridad), ello contrasta con la elevada cantidad de individuos con estructuras reproductivas (cistocarpos) los cuales ya se habían generado a partir de estaciones anteriores con fotoperiodos cortos (invierno, primavera). Una colecta en otras estaciones del año podría brindarnos información valiosa que permita comparar la producción de esporas anualmente.

Es importante tener en cuenta que la presencia de individuos fértiles en campo no garantiza la liberación de esporas. En India, [Chennubhotla et al. \(1986\)](#) tomaron muestras tetraesporofíticas y cistocárpicas *G. lemaneiformis* para evaluar su viabilidad reproductiva, pero, ninguna liberó esporas en condiciones de laboratorio. Esto demuestra la importancia de estudiar las condiciones que influyen o podrían estar ligados a la liberación de esporas de las poblaciones a pesar de la aparente fertilidad que presentan. [Aguilar-Rosas et al. \(1993\)](#) observaron que, en sustratos suaves, el desarrollo de esporas era improbable y predominaba la reproducción vegetativa. En cambio, en sustratos duros, se favorecía el asentamiento de esporas y permitía a especie alternar entre sus distintas etapas de vida. Otro estudio demostró que ambos tipos de esporas (tetra y carposporas) de *G. lemaneiformis* pueden sobrevivir algunas semanas en oscuridad absoluta ([Bird et al., 1977](#)) e inclusive unos días de desecación. Adicionalmente, se ha registrado mejores resultados de liberación de esporas al alargar la etapa nocturna ([Umamaheswara, 1976; Umamaheswara y Subbarangaiah, 1981](#)). Así se evidencia que es necesario experimentar distintos factores fisicoquímicos, así como diversas metodologías, para obtener el máximo rendimiento posible, no solo de liberación de esporas si no de maduración de estructuras ([Glenn et al., 1996; Alveal et al., 1997](#)).

Uno de los principales desafíos en el cultivo de *G. lemaneiformis* es el control de bacterias y epífitos, que pueden inhibir la germinación de las esporas, como lo demostraron [Egan et al. \(2001\)](#). Además, la extracción descontrolada de poblaciones naturales pone en riesgo la sostenibilidad del recurso. [Avila-Peltroche y Padilla-Vallejos \(2020\)](#) advirtieron que la recolección intensiva de macroalgas sin planes de manejo adecuados afecta la biodiversidad y la capacidad de regeneración de las praderas naturales. Nuestros resultados indican que las poblaciones en la zona A

could provide valuable information to compare spore production on a yearly basis.

It is important to keep in mind that the presence of fertile individuals in the field does not guarantee the release of spores. In India, [Chennubhotla et al. \(1986\)](#) took tetrasporophytic and cystocarpic samples *G. lemaneiformis* to assess their reproductive viability, but none released spores under laboratory conditions. This demonstrates the importance of studying the conditions that influence or could be linked to the release of spores from populations despite their apparent fertility. [Aguilar-Rosas et al. \(1993\)](#) observed that, on soft substrates, spore development was unlikely and vegetative reproduction predominated. On the other hand, on hard substrates, spore settlement was favored and allowed the species to alternate between its different life stages. Another study showed that both types of spores (tetra- and carpospores) from *G. lemaneiformis* can survive a few weeks in absolute darkness ([Bird et al., 1977](#)) and even a few days of desiccation. In addition, better spore release results have been reported by lengthening the night stage ([Umamaheswara, 1976; Umamaheswara and Subbarangaiah, 1981](#)). Thus, it is evident that it is necessary to experiment with different physicochemical factors, as well as different methodologies, to obtain the maximum possible yield, not only of spore release but also of maturation of structures ([Glenn et al., 1996; Alveal et al., 1997](#)).

One of the main challenges in the cultivation of *G. lemaneiformis* is the control of bacteria and epiphytes, which can inhibit spore germination, as demonstrated by [Egan et al. \(2001\)](#). In addition, the uncontrolled extraction of natural populations jeopardizes the sustainability of the resource. [Avila-Peltroche and Padilla-Vallejos \(2020\)](#) warned that intensive harvesting of macroalgae without adequate management plans affects biodiversity and the regeneration capacity of natural beds. Our results indicate that populations in zone A show high levels of reproductive maturity, which could be exploited through a sustainable harvesting model based on the spore cultivation technique. This approach would make it possible to take advantage of the reproductive potential of natural grasslands without compromising their regeneration, favoring the production of seed from spores.

Recent research on *G. lemaneiformis* have focused on growth ([Yang et al., 2006, Ye et al., 2006](#)), biomass yield ([Zhou et al., 2013a, 2016](#)), biochemical composition ([Zhang et al., 2020](#)) and environmental requirements ([Pan et al., 2022](#)). These studies

presentan altos niveles de madurez reproductiva, lo que podría aprovecharse mediante un modelo de recolección sostenible basado en la técnica de esporocultivo. Este enfoque permitiría aprovechar el potencial reproductivo de las praderas naturales sin comprometer su regeneración, favoreciendo la producción de semilla a partir de esporas

Las investigaciones recientes sobre *G. lemaneiformis* se han centrado en el crecimiento (Yang *et al.*, 2006; Ye *et al.*, 2006), rendimiento de biomasa (Zhou *et al.*, 2013a, 2016), composición bioquímica (Zhang *et al.*, 2020) y requisitos ambientales (Pan *et al.*, 2022). Estos estudios resaltan la importancia de optimizar las condiciones de cultivo para maximizar la productividad de la especie, al tiempo que intentamos minimizar el impacto de extracción en los ecosistemas.

En términos de cultivo, la propagación vegetativa sigue siendo la técnica más empleada, aunque presenta limitaciones como la baja diversidad genética y la susceptibilidad a enfermedades (Freitas *et al.*, 2021). Estudios recientes han demostrado que la diversificación de los métodos de propagación, incluyendo el uso de esporas, podría mejorar la productividad y reducir la propagación de patologías en cultivos intensivos (Murúa *et al.*, 2024). Además, la selección genética y la manipulación de condiciones ambientales han sido utilizadas con éxito en China para optimizar la producción de agar en *G. lemaneiformis* (Xiao *et al.*, 2022), lo que subraya la necesidad de continuar con estudios en el contexto peruano, considerando sus particularidades ambientales y productivas.

CONCLUSIÓN

El potencial reproductivo de la *G. lemaneiformis*, la distribución de nivel de madurez de cistocarpos, y el número de cistocarpos por gramos de macroalga, presentan diferencias significativas, dependiendo de la zona de extracción de individuos, más no la cantidad de esporas por cistocarpos. De todas las muestras de *G. lemaneiformis* recolectados en la playa San Andrés, se pudo obtener en promedio: 137 359 esporas g^{-1} , 275 cistocarpos, Potencial Reproductivo de 154 097 esporas gr^{-1} . Los datos de este trabajo señalan que las condiciones de orilla serían propicias para la madurez de estructuras reproductivas y liberación de esporas en esta especie. Es necesario llevar a cabo estudios adicionales que puedan complementar esta investigación, como

highlight the importance of optimizing growing conditions to maximize the productivity of the species, while trying to minimize the impact of extraction on ecosystems.

In terms of cultivation, vegetative propagation is still the most widely used technique, although it has limitations such as low genetic diversity and susceptibility to diseases (Freitas *et al.*, 2021). Recent studies have shown that diversification of propagation methods, including the use of spores, could improve productivity and reduce the spread of pathologies in intensive crops (Murúa *et al.*, 2024). In addition, genetic selection and manipulation of environmental conditions have been successfully used in China to optimize agar production in *G. lemaneiformis* (Xiao *et al.*, 2022), which underlines the need to continue with studies in the Peruvian context, considering its environmental and productive particularities.

CONCLUSION

The reproductive potential of *G. lemaneiformis*, the distribution of the level of maturity of cystocarps, and the number of cystocarps per gram of seaweed, show significant differences, depending on the area of extraction of individuals, but not the number of spores per cystocarp. From all samples of *G. lemaneiformis* collected at San Andrés beach, we obtained an average of 137 359 spore g^{-1} , 275 cystocarps, Reproductive Potential of 154 097 spores g^{-1} . The data from this work indicate that shore conditions would be conducive to the maturity of reproductive structures and spore release in this species. Additional studies are needed that can complement this research, such as spore settlement, germination, spore production evaluations at different times of the year and biomass estimation in natural beds. These studies could lead to the suggestion of management plans in the coastal region of Peru. In turn, the production data can be used for the development of a spore-culture of the species for possible future scaling-up.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Programa Nacional de Innovación en Perca y Acuicultura (PNIPA) and the Universidad Científica del Sur (UCSUR No. 056-2022-PRO99) for being the entities that financed the present research work that was framed within the project: "Implementación de un plantel de cultivo piloto comercial de *Gracilariopsis lemaneiformis* "pelillo" empleando dos sistemas de cultivo (fondo y suspendido) para su evaluación en el rendimiento de

el asentamiento de esporas, la germinación, las evaluaciones de producción de esporas en diferentes épocas del año y la estimación de la biomasa en las praderas naturales. Estos estudios podrían llevar a sugerir planes de manejo en la región costera del Perú. A su vez, los datos de producción pueden ser empleados con fines de desarrollo de un esporo-cultivo de la especie para un posible escalamiento a futuro.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA) y a la Universidad Científica del Sur (UCSUR N° 056-2022-PRO99) por ser las entidades que financiaron el presente trabajo de investigación que se encontraba enmarcado dentro del proyecto: “Implementación de un plantel de cultivo piloto comercial de *Gracilariopsis lemaneiformis* “pelillo” empleando dos sistemas de cultivo (fondo y suspendido) para su evaluación en el rendimiento de obtención del ficocoloide agar” - Contrato N° 452-2020-PNIPA-SUBPROYECTO.

obtención del ficocoloide agar” - Contract No. 452-2020-PNIPA-SUBPROYECTO.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Aguilar-Rosas, R., Marcos-Ramírez, R., Lobo-Niembro, J. and Zertuche-González, J. (1993). Seasonal variation of reproductive and vegetative phases of *Gracilaria pacifica* Abbott, in Estero de Punta Banda, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 19(2), pp.219–228. <https://doi.org/10.7773/cm.v19i2.927>.
- Alveal, K., Romo, H., Werlinger, C. and Oliveira, E.C. (1997). Mass cultivation of the agar-producing alga *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta) from spores. *Aquaculture*, 148(2-3), pp.77–83. [https://doi.org/10.1016/s0044-8486\(96\)01415-9](https://doi.org/10.1016/s0044-8486(96)01415-9).
- Arakaki, N., Schmidts, W.E., Carbajal, P. and Fredericq, S. (2015). First occurrence of *Gracilaria chilensis*, and distribution of *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariaceae, Gracilariales) in Peru on the basis of rbcL sequence analysis. *Phytotaxa*, 208(2), pp.175–181. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.208.2.7>.
- Arbaiza, S. (2016). *Viabilidad reproductiva para el cultivo de Chondracanthus chamissoi proveniente de tres poblaciones del litoral peruano*. [Tesis Maestría en Acuicultura] *Lamolina.edu.pe*, p.114. Available at: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2772>.
- Avila-Peltroche, J. and Padilla-Vallejos, J. (2020). The seaweed resources of Peru. *Botanica Marina*, 63(4), pp.381–394. <https://doi.org/10.1515/bot-2020-0026>.
- Barrera Castillo, V.V. (2024). *Vertimiento de aguas residuales domiciliarias y el grado de contaminación del río Pisco, Ica, 2023*. [Tesis Lic. Ing. Amb] *Unica.edu.pe*, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, p.65. Available at: <https://repositorio.unica.edu.pe/items/89573d43-4c65-49e1-8f12-bf757f8df474>.
- Bellorín, A.M. y Lemus, J. (1997). Efecto de la temperatura y la irradiancia en el crecimiento in vitro del alga *Gracilariopsis tenuifrons* (Bird & Oliveira) Fredericq & Hommersand (Gracilariales, Rhodophyta). *Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 36, pp.61–67.
- Bird, N., McLachlan, J. and Grund, D. (1977). Studies on *Gracilaria*. 5. *In vitro* life history of *Gracilaria* sp. from the Maritime Provinces. *Canadian Journal of Botany*, 55(10), pp.1282–1290. <https://doi.org/10.1139/b77-149>.
- Bulboa, C., Macchiavello, J., Oliveira, E. and Véliz, K. (2008). Growth rate differences between four Chilean populations of edible seaweed *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales). *Aquaculture Research*, 39(14), pp.1550–1555. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02028.x>.
- Buschmann, A.H., López, D.A. and Medina, A. (1996). A review of the environmental effects and alternative production strategies of marine aquaculture in Chile. *Aquacultural Engineering*, 15(6), pp.397–421. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(96\)01006-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(96)01006-0).
- Campos, S., Pinazo, K., Gutiérrez, P. y Quiroz, M. (2017). Monitoreo biológico poblacional del recurso ‘camarón de río’ *Cryphiops caementarius* (Molina, 1782) en los ríos Majes-Camaná y Ocoña. 2015. *Informe del Instituto del Mar del Perú*, 44(3), pp. 268–283. Available at: <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/3225>.
- Castillo, S.J., Espinoza, P.S. y Valdivieso, M.V. (1999). Guía para el cultivo del alga *Gracilaria* y manejo de praderas naturales. Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (Fondepes), Lima. Lima, p.22. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6771351/5868005-cultivo-del-alga-gracilaria-y-manejo.pdf>.
- Chen, X., Tang, Y., Sun, X., Zhang, X. and Xu, N. (2022). Comparative transcriptome analysis reveals the promoting effects of IAA on biomass production and branching of *Gracilariopsis lemaneiformis*. *Aquaculture*, 548, p.737678. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737678>.
- Chennubhotla, K.V.S., Kaliaperumal, N., Ramalingam, R.J. and Kalimuthu, S. (2015). Growth, reproduction and spore output in *Gracilaria foliifera* (Forsskal) Boergesen and *Gracilariopsis sjoestedtii* (Kyllin) Dawson around Mandapam. *Indian Journal of Fisheries*, 33(1), pp.76–84. Available at: https://eprints.cmfri.org.in/3731/Article_09.pdf.

- Cisneros, R., Bautista, J. y Santos, C. (1997). Cultivo experimental del alga *Gracilariopsis lemaneiformis* en ambiente natural. *Informe Progresivo del Instituto del Mar Perú*, 60: 3–10. Disponible en: <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/1455>.
- Cotas, J., Gomes, L., Pacheco, D. and Pereira, L. (2023). Ecosystem services provided by seaweeds. *Hydrobiology*, 2(1), pp. 75–96. <https://doi.org/10.3390/hydrobiology2010006>
- Egan, S., James, S., Holmström, C. and Kjelleberg, S. (2001). Inhibition of algal spore germination by the marine bacterium *Pseudoalteromonas tunicata*. *FEMS Microbiology Ecology*, 35(1), pp. 67–73. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2001.tb00789.x>.
- Freitas, M., Mouga, T., Ana Patrícia Correia, Afonso, C. and Baptista, T. (2021). New insights on the sporulation, germination, and nutritional profile of *Gracilaria gracilis* (Rhodophyta) grown under controlled conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), pp. 562–562. <https://doi.org/10.3390/jmse9060562>.
- Gerard, V.A. (1988). Ecotypic differentiation in light-related traits of the kelp *Laminaria saccharina*. *Marine Biology*, 97(1), pp. 25–36. <https://doi.org/10.1007/bf00391242>.
- Glenn, E.P., Moore, D., Fitzsimmons, K. and Azevedo, C. (1996). Spore culture of the edible red seaweed, *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta). *Aquaculture*, 142(1-2), pp. 59–74. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01249-4](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01249-4).
- González, M., Montoya, R., Candia, A., Gómez, P. and Cisternas, M. (1996). Organellar DNA restriction fragment length polymorphism (RFLP) and nuclear random amplified polymorphic DNA (RAPD) analyses of morphotypes of *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta) from Chile. In: *Fifteenth International Seaweed Symposium*. Dordrecht, Netherlands: Springer, pp. 229–234. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1659-3_32.
- González-Leija, J.A., Hernández-Garibay, E., Pacheco-Ruiz, I., Guardado-Puentes, J., Espinoza-Avalos, J., López-Vivas, J.M. and Bautista-Alcantar, J. (2008). Optimization of the yield and quality of agar from *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariales) from the Gulf of California using an alkaline treatment. *Journal of Applied Phycology*, 21(3), pp. 321–326. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9370-0>.
- Guzmán-Urriostegui, A. and Robledo, D. (1999). Factors affecting sporulation of *Gracilaria cornea* (Gracilariales, Rhodophyta) carposporophytes from Yucatan, Mexico. *Hydrobiologia*, 398/399, pp. 285–290. <https://doi.org/10.1023/a:1017071427664>.
- Halling, C., Aroca, G., Cifuentes, M., Buschmann, A.H. and Troell, M. (2005). Comparison of spore inoculated and vegetative propagated cultivation methods of *Gracilaria chilensis* in an integrated seaweed and fish cage culture. *Aquaculture International*, 13(5), pp. 409–422. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-6977-x>
- Hayashi, L., Bulboa, C., Kradolfer, P., Soriano, G. and Robledo, D. (2013). Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), pp. 719–727. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0143-z>.
- Infante, R. y Candia, A. (1988). Cultivo de *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss e *Iridaea ciliata* Kitzing (Rhodophyta, Gigartinales) en laboratorio: esporulación inducida y colonización de carposporas en diferentes sustratos. *Gayana Botánica*, 45, pp. 297–304.
- Jiang, H., Zou, D. and Chen, B. (2018). Effects of reduced carbon supply and sunlight on photosynthetic and antioxidant activities of *Gracilariopsis lemaneiformis*, and subsequent changes of these activities under recovery conditions with different salinities. *Aquaculture*, 493, pp. 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.014>.
- Kain, J.M. and Destombe, C. (1995). A review of the life history, reproduction and phenology of *Gracilaria*. *Journal of Applied Phycology*, 7(3), pp. 269–281. <https://doi.org/10.1007/bf00004001>.
- Li, P., Chen, H., Zhang, J., Feng, X., Xiao, B., Hu, Y. and Sui, Z. (2023). Effects of nutrient deficiency on the branch phenotype of the macroalgae *Gracilariopsis lemaneiformis* (Rhodophyta). *Aquaculture*, 562, p. 738794. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738794>.
- Li, T., Wu, J., Du, H., Pei, P., Yang, C., Huang, J., Liu, X., Liang, H., Chen, W., Zhang, D. and Lin, S. (2022). Environmental nitrogen and phosphorus nutrient variability triggers intracellular resource reallocation in *Gracilariopsis lemaneiformis* (Rhodophyta). *Algal Research*, 66, p. 102778. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102778>.
- Lideman, L., Bahri, S., Marwan, N., Hartanto, N., Laining, A. and Tassakka, A. (2019). Releasing, attaching and growing of seaweed (*Gracilaria* sp.) spores in several culture media. *AACL Bioflux*, 12(6), pp. 2137–2146. <https://bioflux.com.ro/docs/2019.2137-2146.pdf>.
- Liu, L., Zou, D., Jiang, H., Chen, B. and Zeng, X. (2017). Effects of increased CO₂ and temperature on the growth and photosynthesis in the marine macroalga *Gracilaria lemaneiformis* from the coastal waters of South China. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), pp. 1271–1280. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1316-y>.
- Liu, S., Zhang, J., Hu, C., Sun, X. and Xu, N. (2021). Physiological and transcriptome analysis of γ-aminobutyric acid (GABA) in improving *Gracilariopsis lemaneiformis* stress tolerance at high temperatures. *Algal Research*, 60, pp. 102532–102532. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102532>.
- Marín-Salgado, H. y Peña-Salamanca, E.J. (2025). Características histológicas de las fases reproductivas del alga roja *Gracilaria blodgettii* (Gracilariaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(135), pp. 125–132. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000200001.
- Mazumder, S., Ghosal, P.K., Stortz, C.A., Carlucci, M., Damonte, E.B. and Ray, B. (2002). Isolation, chemical investigation and antiviral activity of polysaccharides from *Gracilaria corticata* (Gracilariaceae, Rhodophyta). *International Journal of Biological Macromolecules*, 31(1-3), pp. 87–95. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(02\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(02)00070-3).
- McAlice, B.J. (1971). Phytoplankton sampling with sedgwick rafter cell. *Limnology and Oceanography*, 16(1), pp. 19–28. <https://doi.org/10.4319/lo.1971.16.1.0019>.
- Meinita, M.D.N., Marhaeni, B., Winanto, T., Jeong, G.-T., Khan, M.N.A. and Hong, Y.-K. (2013). Comparison of agarophytes (*Gelidium*, *Gracilaria*, and *Gracilariopsis*) as potential resources for bioethanol production. *Journal of Applied Phycology*, 25(6), pp. 1957–1961. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0041-4>.
- Michetti, K.M., Martín, L.A. and Leonardi, P.I. (2013). Carpospore release and sporeling development in *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) from the southwestern Atlantic coast (Chubut, Argentina). *Journal of Applied Phycology*, 25(6), pp. 1917–1924. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0029-0>.
- Murúa, P., Muñoz, L., Bustamante, D., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Strittmatter, M., Arce, P., Westermeier, R., Müller, D.G. and Gachon, C.M.M. (2024). The first phycopathological atlas in Latin America unveils the underdocumentation of algal pathogens. *Algal research*, 62, p. 103604. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103604>.
- Pan, Z., Yu, Y., Chen, Y., Yu, C., Xu, N. and Li, Y. (2022). Combined effects of biomass density and low-nighttime temperature on the competition for growth and physiological performance of *Gracilariopsis lemaneiformis* and *Ulva prolifera*. *Algal Research*, 62, p. 102638. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102638>.
- Pang, T., Lu, L., Xue, J., Xin, X. and Liu, J. (2023). A new mode of cultivating *Gracilariopsis lemaneiformis* for saving environmental and economic costs: Keeping a full stand of vegetative frond cuttings in northern China

- during the winter. *Aquaculture*, 571, pp. 739459–739459. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739459>.
- Ren, X., Zhang, X. and Sui, Z. (2006). Identification of phase relative genes in tetrasporophytes and female gametophytes of *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariaceae, Rhodophyta). *Electronic Journal of Biotechnology*, 9(2), pp. 127–132. <https://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v9n2-11>.
- Rodríguez, E., Fernández, M., Alvítez, E., Pollack, L., Luján, L., Geldres, C. y Paredes, Y. (2018). Algas marinas del litoral de la región La Libertad, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), pp. 71–81. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.08>.
- Romo, H. (1988). Cultivo de algas mediante esporas. *Investigación Pesquera-Instituto de Fomento Pesquero*, 35, pp.89–98.
- Santelices, B., Vásquez, J., Ohme, U. and Fonck, E. (1984). Managing wild crops of *Gracilaria* in central Chile. In: *Eleventh International Seaweed Symposium*. Dordrecht, Netherlands: Springer, pp.77–89. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6560-7_12.
- Solís Acosta, J. e Inca, J. (2000). Características hidroquímicas en la bahía de Paracas, Pisco, a fines de la primavera 1999. *Informe Progresivo del Instituto del Mar del Perú*, 123: 3-19. Available at: <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/1153>.
- Song, T., Liu, L., Tang, Q., Xiang, S., Wang, B., Zhang, S., Wang, X., Chu, Y., Luo, D. and Lin, J. (2021). Antioxidant neoagarooligosaccharides (NAOs) and dietary fiber production from red algae *Gracilariopsis lemaneiformis* using enzyme assisted one-step process. *Food Hydrocolloids*, 125, pp. 107382–107382. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107382>.
- Umamaheswara, M.R. (1976). Spore liberation in *Gracilaria corticata* J. Agardh growing at Mandapam. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 21(1), pp. 91–98. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(76\)90071-x](https://doi.org/10.1016/0022-0981(76)90071-x).
- Umamaheswara, R.M. and Subbarangaiah, G. (1981). Effects of environmental factors on the diurnal periodicity of tetraspores of some Gigartinales (Rhodophyta). In: *International Seaweed Symposium (Xth)*. Berlin, Germany: DeGruiter Brill, pp.209–214. <https://doi.org/10.1515/9783110865271-019>.
- Wang, X., He, L., Ma, Y., Huan, L., Wang, Y., Xia, B. and Wang, G. (2020). Economically important red algae resources along the Chinese coast: History, status, and prospects for their utilization. *Algal Research*, 46, p. 101817. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101817>.
- Wang, Z., Wang, G., Niu, J., Wang, W. and Peng, G. (2010). Optimization of conditions for tetraspore release and assessment of photosynthetic activities for different generation branches of *Gracilaria lemaneiformis* Bory. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(4), pp. 738–748. <https://doi.org/10.1007/s00343-010-9908-2>.
- Wei, Z., Zhang, Y., Yang, F. and Liang, J. (2021). Increased light availability modulates carbon and nitrogen accumulation in the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) in response to ocean acidification. *Environmental and Experimental Botany*, 187, p. 104492. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104492>.
- Xiao, B., Hu, Y., Feng, X. and Sui, Z. (2022). Breeding of new strains of *Gracilaria lemaneiformis* with high agar content by ARTP mutagenesis and high osmotic pressure screening. *Marine Biotechnology*, 25(1), pp. 100–108. <https://doi.org/10.1007/s10126-022-10184-2>.
- Yang, Y., Li, W., Li, Y. and Xu, N. (2021). Photophysiological responses of the marine macroalga *Gracilaria lemaneiformis* to ocean acidification and warming. *Marine Environmental Research*, 163, p. 105204. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105204>.
- Yang, Y.-F., Fei, X.-G., Song, J.-M., Hu, H.-Y., Wang, G.-C. and Chung, I.K. (2006). Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters. *Aquaculture*, 254(1-4), pp. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.08.029>.
- Ye, N., Wang, H. and Wang, G. (2006). Formation and early development of tetraspores of *Gracilaria lemaneiformis* (Gracilaria, Gracilariaceae) under laboratory condition. *Aquaculture*, 254(1-4), pp. 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.08.026>.
- Zhang, X., Hu, C., Sun, X., Zang, X., Zhang, X., Fang, T. and Xu, N. (2020). Comparative transcriptome analysis reveals chitooligosaccharides-induced stress tolerance of *Gracilaria lemaneiformis* under high temperature stress. *Aquaculture*, 519, p. 734876. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734876>.
- Zhou, W., Sui, Z., Wang, J. and Chang, L. (2013a). An orthogonal design for optimization of growth conditions for all life history stages of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Aquaculture*, 392-395, pp. 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.008>.
- Zhou, W., Hu, Y., Sui, Z., Fu, F., Wang, J., Chang, L., Guo, W. and Li, B. (2013b). Genome survey sequencing and genetic background characterization of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) based on next-generation sequencing. *PLoS One*, 8(7), p. e69909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069909>.
- Zhou, W., Sui, Z., Wang, J., Hu, Y., Kyoung Ho Kang, Hak Bae Kim and Niaz, Z. (2016). Mass cultivation of economically important red alga *Gracilaria lemaneiformis* (Gracilariaceae, Rhodophyta) from tetraspores and carpospores. *Aquaculture*, 460, pp. 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.03.052>.



ARTÍCULO / ARTICLE

Estimación de tallas de anchoveta (*Engraulis ringens*) mediante ecosonda en áreas pesqueras de difícil acceso en la Región de Atacama, Chile

Length estimation of anchovy (*Engraulis ringens*) using echosounder in difficult to access fishing areas in the Atacama Region, Chile

Luis La Cruz^{1*}

0000-0002-2208-4538

luis.lacruz@ifop.cl

Javier Legua¹

0000-0001-6539-6745

javier.legua@ifop.cl

Adrián Ibieta¹

0000-0002-1220-5850

adrian.ibieta@ifop.cl

Cristián Henríquez-Pastene¹

0009-0005-1221-3817

cristian.henriquez@ifop.cl

Francisco Leiva-Dietz¹

0000-0003-4304-6247

francisco.leiva@ifop.cl

1. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Valparaíso, Chile

* Autor de correspondencia/Corresponding Author:

Recibido / Received: 07/03/2024

Aceptado / Accepted: 21/04/2025

Citación / Citation: La Cruz, L.; Henríquez-Pastene, C.; Ibieta, A.; Leiva-Dietz, F. 2025. Estimación de tallas de anchoveta (*Engraulis ringens*) mediante ecosonda en áreas pesqueras de difícil acceso. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 70-89

RESUMEN

Este estudio explora el uso de métodos hidroacústicos para estimar la distribución de las longitudes de anchovetas, ofreciendo una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo biológico. Se recolectaron datos acústicos utilizando dos algoritmos: Single Target y Tracked Target, junto con un modelo de conversión de TS a longitud específico para anchoveta. Los resultados mostraron que el algoritmo Single Target estimó tamaños de 8,5 a 16 cm, con una moda de 12,0 cm, mientras que el algoritmo Tracked Target identificó un rango de 9 a 14 cm, con una moda de 11,5 cm. Las anchovetas juveniles representaron el 45,8% y el 51,2% de la población en cada algoritmo. Además, la profundidad de los ecos osciló entre 3,92 y 43,95 m, lo que sugiere que las anchovetas de mayor longitud tienden a habitar zonas costeras más profundas, posiblemente como una adaptación fisiológica a estos ambientes. El estudio demuestra la efectividad de la hidroacústica para estimar las tallas de peces, especialmente en áreas donde el muestreo tradicional es inaccesible o difícil de llevar a cabo. Este enfoque contribuye a comprender la dinámica de las poblaciones de peces y abre la puerta a futuros estudios.

Palabras clave: Pelágico, anchoveta, pesquerías, monitoreo, ecosonda.

ABSTRACT

This study explores the use of hydroacoustic methods to estimate the size distribution of Peruvian anchoveta, offering an alternative to traditional biological sampling methods. Acoustic data were collected using two algorithms: Single Target and Tracked Target, along with a TS to length conversion model specific to Peruvian anchoveta. The results showed that the Single Target algorithm estimated sizes ranging from 8.5 to 16 cm, with a mode of 12.0 cm, while the Tracked Target algorithm identified a range of 9 to 14 cm, with a mode of 11.5 cm. Juvenile anchovies represented 45.8% and 51.2% of the population in each algorithm, respectively. Additionally, the depth of the echoes ranged from 3.92 to 43.95 m, suggesting that larger Peruvian anchoveta tend to inhabit deeper coastal zones, possibly as a physiological adaptation to these environments. The study demonstrates the effectiveness of hydroacoustics for estimating fish sizes, especially in areas where traditional sampling is inaccessible or difficult to carry out. This approach contributes to understanding fish population dynamics and opens the door to future studies.

Key words: Pelagic, Peruvian anchoveta, fisheries, monitoring, echo sounder

INTRODUCCIÓN

El Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH), situado a lo largo de la costa occidental de Sudamérica, destaca como uno de los cuatro sistemas de afloramiento más significativos a lo largo de los bordes orientales de los grandes océanos (Chávez y Messié, 2009). Este sistema sufre variaciones climáticas multidecenales (El Viejo/La Vieja) e interanuales (El Niño/La Niña), que influyen en el afloramiento, la temperatura y la dinámica de producción (Harrison y Chiodi, 2015). Estas variaciones tienen efectos sobre la distribución y abundancia de las poblaciones de pequeños pelágicos (Alheit y Niquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Niquen y Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020; Castillo *et al.*, 2021). El SCH sustenta la mayor población mundial de anchoveta (*Engraulis ringens* Jenyns, 1842) (Gutiérrez *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2021), una de las especies de peces pelágicos pequeños más productivos, cuya distribución se extiende desde el norte de Perú hasta el sur de Chile (Alheit y Niquen, 2004). Administrativamente, a lo largo de las costas de Chile, existen tres unidades de pesquería de anchoveta: La Unidad de Pesquería Norte (Regiones de Arica y Parinacota - Antofagasta), la Unidad de Pesquería Centro Norte (Regiones de Atacama - Coquimbo), y la Unidad de Pesquería Centro Sur (Regiones de Valparaíso-Los Lagos) (Garcés *et al.*, 2019). La pesquería opera principalmente en la zona costera, con capturas significativas registradas entre 1997 y 2016 (Hernández-Santoro *et al.*, 2019).

Los estudios acústicos desempeñan un papel crucial en la gestión de los pequeños peces pelágicos, como la anchoveta en el SCH (Hilborn y Walters, 2013; Ganias, 2014). La evaluación del tamaño de los peces es un componente clave tanto en las evaluaciones acústicas como en las estrategias de gestión pesquera (Hilborn y Walters, 2013). Tradicionalmente, las longitudes se han medido visualmente utilizando métodos manuales y tablas métricas (Øvredal y Totland, 2002), así como mediante enfoques semimanuales y automáticos que utilizan equipos ópticos (Gibson *et al.*, 2016). Estos métodos son eficaces cuando los peces están cerca de dispositivos ópticos de medición o de buques pesqueros con artes asociados. Sin embargo, surgen desafíos en circunstancias específicas o desfavorables en las que el comportamiento de los peces se ve influido por las condiciones ambientales, lo que hace poco práctico llevar a cabo el lance de pesca (Øvredal y Totland,

INTRODUCTION

The Humboldt Current System (HCS), situated along the west coast of South America, stands out as one of the four most significant upwelling systems along the eastern edges of the major oceans (Chávez and Messié, 2009). This system undergoes both multi-decadal (El Viejo/La Vieja) and interannual (El Niño/La Niña) climatic variations, influencing upwelling, temperature, and production dynamics (Harrison and Chiodi, 2015). These variations have profound effects on the distribution and abundance of small pelagic populations (Alheit and Niquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Niquen and Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020; Castillo *et al.*, 2021). HCS supports the world's largest anchovy (Peruvian anchoveta, *Engraulis ringens* Jenyns, 1842) population (Gutiérrez *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2021), one of the most productive small pelagic fish species, distributed from northern Perú to southern Chile (Alheit and Niquen, 2004). Administratively, along the coasts of Chile, there are three Peruvian anchoveta fishery units: The North Fishery Unit (Arica and Parinacota - Antofagasta Regions), the North Central Fishery Unit (Atacama - Coquimbo Regions), and the South-Central Fishery Unit (Valparaíso-Los Lagos Regions) (Garcés *et al.*, 2019). The fishery operates primarily in the coastal zone, with significant catches recorded between 1997 and 2016 (Hernández-Santoro *et al.*, 2019).

Acoustic surveys play a crucial role in the management of small pelagic fish, such as anchovy in the HCS (Hilborn and Walters, 2013; Ganias, 2014). Assessing fish size is a key component in both acoustic evaluations and fisheries management strategies (Hilborn and Walters, 2013). Traditionally, lengths have been visually measured using manual methods and metric boards (Øvredal and Totland, 2002), as well as through semi-manual and automatic approaches utilizing optical equipment (Gibson *et al.*, 2016). These methods are effective when fish are close to optical measuring devices or fishing vessels with associated gear. However, challenges arise in specific or unfavorable circumstances where fish behavior is influenced by environmental conditions, making it impractical to conduct the fishing set (Øvredal and Totland, 2002; Kubilius *et al.*, 2023). The inaccessibility of fishing nets to anchovy shoals is a common occurrence during fishing seasons and in certain situations during acoustic surveys (such as when Peruvian anchoveta schools are very close to the coast or near the bottom) (Niquen and Bouchon, 2004; Yáñez *et*

2002; Kubilius *et al.*, 2023). La inaccesibilidad de las redes de pesca a los cardúmenes de anchoveta es un hecho habitual durante temporadas de pesca y en determinadas situaciones durante los estudios acústicos (como cuando los cardúmenes de anchoveta están muy cerca de la costa o cerca del fondo) (Ñiquen y Bouchon, 2004; Yáñez *et al.*, 2004; Gutiérrez *et al.*, 2007; Bertrand *et al.*, 2008; Hernández-Santoro *et al.*, 2019). La acústica pesquera se perfila como una valiosa herramienta para estimar el tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005).

La conversión de las mediciones acústicas para estimar la longitud de los peces implica el análisis de objetivos individuales en ecogramas (Simmonds y MacLennan, 2005). Varias publicaciones ofrecen una visión completa de los principios fundamentales de esta metodología (Kubilius *et al.*, 2023; Palermino *et al.*, 2023) y demuestran una fuerte correlación entre el TS y la longitud de los peces. La relación entre el TS y la longitud (L , cm) puede estimarse como $TS = 20\log_{10}(L) - b_{20}$ (dB re 1 m²), donde b_{20} es un parámetro específico del género o la especie (Simmonds y MacLennan, 2005). Las investigaciones han demostrado que el TS puede utilizarse para estimar la longitud de los peces mediante ecuaciones de regresión. Uno de estos factores es la Fuerza de Blanco (TS) de *Engraulis mordax*, estimada en -45.3 dB (sd = 5.7) para una longitud media de 12.1 cm (sd = 1.1), lo que corresponde a un valor de b_{20} de 67.3 dB. (Zwolinski *et al.*, 2017). Estas ecuaciones permiten a los investigadores convertir las mediciones de TS en longitud de los peces. La Fuerza de Blanco (TS por sus siglas en inglés, dB re 1 m²) (MacLennan *et al.*, 2002) sirve como indicador fiable del tamaño de los peces en acústica submarina, siempre que se tengan en cuenta cuidadosamente las relaciones específicas de cada especie y los factores que influyen. Las mediciones precisas del TS permiten estimar con eficacia el tamaño de los peces, calcular la biomasa y discriminar las especies, lo que resulta esencial para la gestión sostenible de la pesca y los estudios ecológicos (Hinchliffe *et al.*, 2025).

La pesquería de anchoveta en la región chilena de Atacama es un sistema complejo en el que influyen factores medioambientales, económicos y sociales. Una gestión eficaz requiere una comprensión exhaustiva de esta dinámica y la aplicación de prácticas sostenibles para mitigar los efectos del cambio climático y la sobreexplotación. El estado de la anchoveta a lo largo de las aguas de la Región de Atacama se evalúa mediante modelos,

al., 2004; Gutiérrez *et al.*, 2007; Bertrand *et al.*, 2008; Hernández-Santoro *et al.*, 2019). Fishery acoustics emerge as a valuable tool for estimating fish size (Simmonds and MacLennan, 2005).

The conversion of acoustic measurements to estimate fish length involves analyzing individual targets on echograms (Simmonds and MacLennan, 2005). Several publications provide comprehensive insights into the fundamental principles of this methodology (Kubilius *et al.*, 2023; Palermino *et al.*, 2023) and demonstrate a strong correlation between TS and fish length. The relationship between TS and length (L ; cm) can be estimated as $TS = 20\log_{10}(L) - b_{20}$ (dB re 1 m²), where b_{20} is a genus or species-specific parameter (Simmonds and MacLennan, 2005). Research has shown that the TS can be used to estimate fish length through regression equations. One of these factors is the target strength (TS) of *Engraulis mordax*, estimated at -45.3 dB (sd = 5.7) for a mean length of 12.1 cm (sd = 1.1), which corresponds to a b_{20} value of 67.3 dB (Zwolinski *et al.*, 2017). These equations allow researchers to convert TS measurements into estimates of fish length. Target strength (TS, dB re 1 m²) (MacLennan *et al.*, 2002) serves as a reliable proxy for fish size in underwater acoustics, provided that species-specific relationships and influencing factors are carefully considered. Accurate TS measurements enable effective fish size estimation, biomass calculation, and species discrimination, which are essential for sustainable fisheries management and ecological studies (Hinchliffe *et al.*, 2025).

The Peruvian anchoveta fishery in the Atacama Region of Chile is a complex system influenced by environmental, economic, and social factors. Effective management requires a comprehensive understanding of these dynamics and the implementation of sustainable practices to mitigate the impacts of climate change and overexploitation. The status of Peruvian anchoveta along the Atacama Region waters be assessed using models, which need an index of abundance and catch time series data to estimate stock and related fisheries references points. In recent years, no Peruvian anchoveta landings have been reported in the Region, creating a significant gap in both biological and fisheries data (IFOP, 2025). This lack of information hinders reliable estimates of fish stock size, productivity, and sustainable catch levels, which are crucial for effective fishery management. Additionally, the inaccessibility of Peruvian anchoveta shoals to fishing nets is a common issue in the coastal zone during acoustic surveys.

que necesitan un índice de abundancia y datos de series temporales de capturas para estimar los puntos de referencia de la población y de las pesquerías relacionadas. En los últimos años, no se han registrado desembarques de anchoveta en la Región, lo que ha creado una importante laguna en los datos biológicos y pesqueros (IFOP, 2025). Esta falta de información dificulta las estimaciones fiables del tamaño de las poblaciones de peces, la productividad y los niveles sostenibles de capturas, que son cruciales para una gestión eficaz de la pesca. Además, la inaccesibilidad de los cardúmenes de anchoveta a las redes de pesca es un problema común en la zona costera durante los estudios acústicos. Esto se debe en gran medida a las condiciones oceanográficas que hacen que las anchovetas se replieguen más cerca de la costa, dificultando su alcance con las redes de pesca habituales. Esta dificultad reduce la precisión de las mediciones de abundancia, lo que complica aún más la evaluación de la dinámica de la población de la especie y socava la calidad de los datos necesarios para la toma de decisiones informadas en la gestión de la pesca. Asimismo, la estimación del tamaño de los peces sin necesidad de muestreo biológico resulta crucial para la evaluación de las poblaciones y la investigación, especialmente cuando se emplean plataformas de sondeo acústico que no pueden muestrear las especies estudiadas (Kubilius *et al.*, 2023). En el presente estudio, nos propusimos estimar la distribución de tallas de anchoveta en la Región de Atacama, Chile utilizando métodos acústicos y algoritmos en el marco del proyecto “Incorporación del monitoreo de anchoveta asociado a la flota pesquera artesanal de la Región de Atacama, Chile, año 2023”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y diseño del muestreo

El estudio acústico se realizó durante los días 12 al 27 de julio de 2023, utilizando la embarcación artesanal “Don Pancracio” para obtener la distribución de los cardúmenes de anchoveta que habitan en las aguas costeras de la región de Atacama, Chile. Los transectos del estudio totalizaron aproximadamente 2780 km (1501 mn), incluyendo 19 transectos oeste-este y 16 norte-sur que abarcaban un área desde el extremo norte de Carrizalillo (26°S) hasta el sur de Punta Pájaros (29°S), incluyendo muestreos aleatorios en zonas costeras. Los transectos tuvieron una longitud aproximada de 13 a 18,5 km (7-10 mn) y estaban

This is largely due to oceanographic conditions that cause the anchovies to retreat closer to the coast, making harder to reach them with standard fishing nets. This difficulty reduces the accuracy of abundance measurements, further complicating the assessment of the species' population dynamics and undermining the quality of the data necessary for informed decision-making in fisheries management. Likewise, estimating fish size without the need for biological sampling proves crucial for stock assessment and research, particularly when employing acoustic surveying platforms that cannot sample the surveyed species (Kubilius *et al.*, 2023). In the present study, we aimed to estimate Peruvian anchoveta length distribution in Atacama Region, Chile using acoustic methods and algorithms within the framework of the “Incorporation of Peruvian anchoveta monitoring associated with the artisanal fishing fleet of the Atacama Region, Chile, year 2023” project.

MATERIALS AND METHODS

Study area and sampling design

The acoustic survey was conducted during July 12 to 27, 2023, using the artisanal vessel “Don Pancracio” to obtain the distribution of Peruvian anchoveta schools living in the coastal waters of Atacama Region, Chile. The survey transects totaled approximately 2780 km (1501 nmi), including 19 west-east and 16 north-south transects spanning an area from the northern tip of Carrizalillo (26°S) to southern Punta Pájaros (29°S), including random sampling in coastal areas. The transects were approximately 13 to 18.5 km (7-10 nmi) long and were 18.5 km apart (Figure 1). The combination of random and systematic acoustic sampling in coastal areas enhanced the spatial and temporal resolution of the acoustic Peruvian anchoveta survey.

separados por 18,5 km (**Figura 1**). La combinación de muestreos acústicos aleatorios y sistemáticos en las zonas costeras mejoró la resolución espacial y temporal del estudio acústico de la anchoveta.

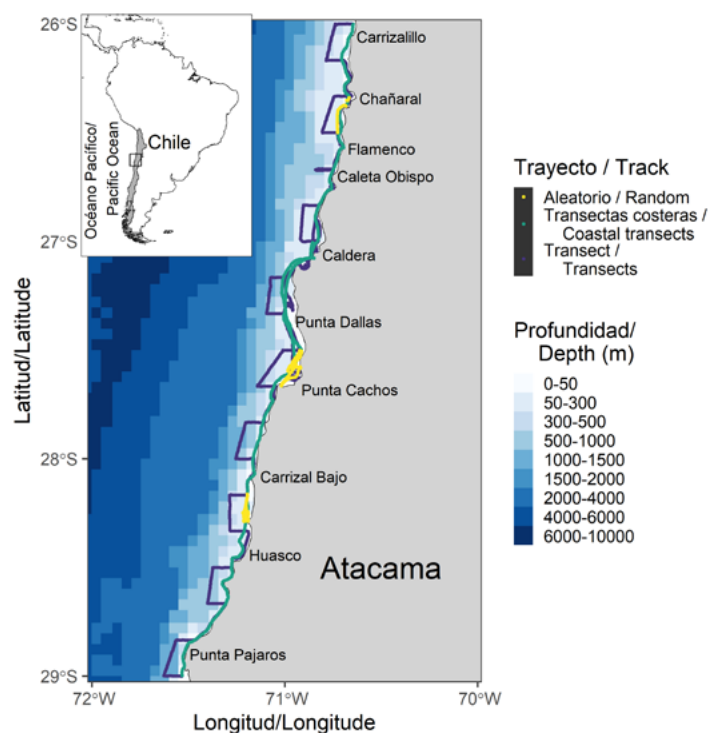


Figura 1. Mapa de la zona de estudio en la Región de Atacama, Chile, que muestra el diseño de muestreo acústico. Las líneas continuas representan los distintos tipos de trayectos: transectos paralelos (en azul), transectas costeras (en verde) y recorridos aleatorios (en color amarillo).

Datos acústicos

Los datos acústicos de banda estrecha (S_v , dB re 1 m^{-1}) a 38 kHz se registraron continuamente con una ecosonda calibrada (Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015) montada en un poste de soporte EK80 (SIMRAD Kongsberg Maritime AS, Horten, Noruega) sobre la banda de estribor del buque de prospección y colocada para proyectarse verticalmente a una profundidad de ~1 m por debajo de la superficie del agua. La calibración de la ecosonda de 38 kHz se realizó antes del crucero en Caldera, Atacama, utilizando una esfera de carburo de tungsteno de 38,1 mm y siguiendo los procedimientos descritos por Foote (1987). El volumen medio de retrodispersión acústica (S_v , dB re

Figure 1. Map of the study area in the Atacama Region, Chile, showing the acoustic survey design. Continuous lines indicate the different types of transects: parallel transects (blue), coastal transects (green), and random paths (yellow).

Acoustic data

Acoustic narrowband data (S_v , dB re 1 m^{-1}) at 38 kHz were recorded continuously with a calibrated (Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015) mounted on a support pole EK80 echosounder (SIMRAD Kongsberg Maritime AS, Horten, Norway) over the starboard side of the survey vessel and positioned to project vertically at a depth of ~1 m below the water surface. The 38 kHz echosounder calibration was performed before the survey in Caldera, Atacama, using a 38.1 mm tungsten carbide sphere and following the procedures described by Foote (1987). The acoustic mean volume backscattering strength S_v (in dB re 1 m^{-1}) was calculated as $S_v = 10 \log(s_v)$, with s_v the volume

1 m⁻¹) se calculó como $S_v = 10 \log(s_v)$, siendo s_v el coeficiente del volumen de retrodispersión en m⁻¹ (MacLennan *et al.*, 2002). Con el fin de medir la Fuerza de Blanco (TS, dB re 1 m²) y realizar un seguimiento de las detecciones individuales, la frecuencia de ping se ajustó al “máximo” para un alcance de adquisición máxima de 150 m. La velocidad del buque fue de 13 km/h durante la generación de los datos acústicos. La configuración del sistema acústico se detalla en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Principales características del buque pesquero artesanal cerquero Don Pancracio y especificaciones de la configuración de la ecosonda científica EK80 (38 kHz) durante el estudio acústico de la anchoveta en el 2023. El texto resaltado en negrita corresponde a los resultados obtenidos durante la calibración de la ecosonda

backscattering coefficient in m⁻¹ (MacLennan *et al.*, 2002). With the aim of measuring Target Strength (TS, dB re 1 m²) and tracking individual detections, the ping rate was set to ‘maximum’ for a maximum acquisition range of 150 m. Vessel speed was 13 km/hr during acquisition of acoustic data. The acoustic system configuration is detailed in [Table 1](#).

Table 1. Main characteristics of the Don Pancracio artisanal purse seiner vessel and specifications of the EK80 (38 kHz) scientific echo sounder configuration during the Peruvian anchoveta acoustic survey in 2023. The highlighted text in bold corresponds to the results obtained during the calibration of the echosounder.

Parámetro / Parameter	Valor / Value
Frecuencia nominal / Nominal frequency (kHz)	38
Nombre del buque / Vessel name	Don Pancracio
Longitud total / Length overall (m)	14.95
Calado máximo / Maximum draft (m)	1.5
Tipo de ingeniería / Engineering type	Diesel
Modelo de transductor / Transducer model	ES38-7 (Serie: 135)
Modo de transmisión / Transmission mode	Onda continua / Continuous wave
Profundidad del transductor / Transducer depth (m)	2.5
Tipo de transductor / Transducer type	Haz dividido / Split-beam
Número de serie del transceptor / Transceiver serial number	582177-1
Versión del programa EK80 / EK80 program version	2.0.1
Duración del impulso / Pulse length (ms)	1.024
Potencia de transmisión / Transmission power (W)	2000
Ganancia / Gain (dB re 1)	26.66
Ancho del haz a 3 dB en dirección proa-popa / 3 dB Beamwidth alongship (°)	6.55
Ancho del haz a 3 dB en dirección babor-estribor / 3 dB Beamwidth Athwartship (°)	6.58
Desviación angular en dirección proa-popa/ Angle offset alongship (°)	-0.01
Desviación angular en dirección babor-estribor / Angle offset athwartship (°)	0.07
Corrección del Sa / Sa correction (dB re 1 m ¹)	0.00
Ángulo del haz bidireccional / Two-way beam angle (dB re 1 sr)	-20.7
Coefficiente de absorción / Absorption coefficient (dB/km)	9.0
Velocidad del sonido / Speed of sound (m/s)	1501.3
Tasa de emisión de ping / Ping emission rate	Máximo / Maximum
RMS (dB)	< 0.2

Los datos acústicos brutos se preprocesaron utilizando el software de código abierto Echo Sounder Package (ESP3) versión 1.46.0 (<https://sourceforge.net/p/esp3/wiki/ESP3/ESP3> Wiki en SourceForge) desarrollado por el NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington, Nueva Zelanda) (Ladroit *et al.*, 2020). Los pasos de procesamiento incluyeron la detección del fondo con corrección manual, la eliminación de la señal transitoria o atenuada (causada principalmente por el bloqueo de la señal debido a las duras condiciones meteorológicas o al movimiento del buque), el ruido impulsivo (señales instantáneas y agudas causadas principalmente por la interferencia de otros sistemas acústicos o eléctricos) y el ruido de fondo (De Robertis y Higginbottom, 2007; Ryan *et al.*, 2015) antes de la detección de los peces individuales (Soule *et al.*, 1997).

Tratamiento y análisis de datos

Los cardúmenes de anchoveta fueron identificados y clasificados mediante un meticuloso examen manual realizado por analistas expertos, teniendo en cuenta la morfología, la densidad y su comportamiento (Robotham *et al.*, 2010; Korneliussen, 2018, Castillo *et al.*, 2022). Se emplearon dos algoritmos para la identificación de la anchoveta: algoritmo de detección de blancos individuales (ST, Single Target) (Ona, 1999; Balk y Lindem, 2000) y el algoritmo de detección de blancos rastreados (Tracked Target, TT o Fish Tracking, FT) (Reid, 2000) (Tabla 2). Las ecuaciones utilizadas están alineadas con los estándares documentadas por Echoview (Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia). El TS puede filtrarse en función de valores umbral mínimos o máximos para cualquier propiedad del blanco individual (peces). El ecograma de TS fue reimportado y analizado mediante técnicas de rastreo de peces para discernir su comportamiento, incluidos los cambios de velocidad y profundidad.

The raw acoustic data were pre-processed using open-source software Echo Sounder Package (ESP3) version 1.46.0 (<https://sourceforge.net/p/esp3/wiki/ESP3/ESP3> Wiki on SourceForge) developed by NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington, New Zealand) (Ladroit *et al.*, 2020). Processing steps included a bottom detection with manual correction, removal of transient or attenuated signal (mostly caused by signal blocking due to harsh weather conditions or vessel movement), impulsive noise (instantaneous and sharp signals mainly caused by interference from other acoustic or electrical systems) and background noise (De Robertis and Higginbottom, 2007; Ryan *et al.*, 2015) before the detection of individual fish traces (Soule *et al.*, 1997).

Data processing and analysis

Peruvian anchoveta schools underwent identification and classification through meticulous manual examination by expert analysts, considering morphology, density, and behavior (Robotham *et al.*, 2010; Korneliussen, 2018, Castillo *et al.*, 2022). Two algorithms were employed for Peruvian anchoveta identification: Single Target (ST) (Ona, 1999; Balk and Lindem, 2000) and Tracked Target (TT) or Fish Tracking (FT) (Reid, 2000) (Table 2). The equations used align with documented standards for Echoview (Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia). TS could be filtered based on minimum or maximum threshold values for any target property. TS echogram underwent reimportation and analysis using fish tracking techniques to discern fish behavior, including speed and depth changes.

Tabla 2. Configuración de los algoritmos de detección de cardúmenes, detección de blancos individuales y blancos rastreados del software acústico ESP3.

Table 2. Settings for school detection, Single Target detections and Target Tracking algorithms in ESP3 acoustic software.

Parámetros del algoritmo de detección / Detection algorithm parameters	Valor / Value
<i>Detección de cardúmenes / School detection</i>	
Longitud mínima del cardumen / Minimum school length (m)	0.8
Altura mínima del cardumen / Minimum school height (m)	0.8
Longitud mínima del candidato / Minimum candidate length (m)	0.8
Distancia máxima de enlace vertical / Maximum vertical linking distance (m)	5
Distancia máxima de enlace horizontal / Maximum horizontal linking distance (m)	10
<i>Algoritmo de detección de blancos individuales / Single Target algorithm</i>	
Profundidad máxima del eco / Maximum echo depth (m)	50
Umbral mínimo del blanco individual / Minimum thresholding on target strength (dB re 1 m ²)	-55
Umbral máximo del blanco individual / Maximum thresholding on target strength (dB re 1 m ²)	-49
Corrección máxima del patrón del haz (dB) / Maximum beam pattern correction (dB)	12
Longitud mínima del pulso normalizada / Minimum normalized pulse length	0.8
Longitud máxima del pulso normalizada / Maximum normalized pulse length	1.2
Desviación estándar máxima de la posición transversal / Maximum standard deviation of across position (°)	0.8
Desviación estándar máxima de la posición longitudinal / Maximum standard deviation of along position (°)	0.8
<i>Algoritmo de detección de blancos rastreados / Tracked Target algorithm</i>	
Número mínimo de blancos individuales en seguimiento / Minimum number of single targets in track	4
Número mínimo de pings (emisiones de sonido) en seguimiento / Minimum number of pings in track (ping)	4
Número máximo de intervalos sin detección en una trayectoria / Maximum number of gaps in track (ping)	2

El TS es una función logarítmica de la sección transversal de retrodispersión (m^2) que depende principalmente de la fisiología interna (principalmente la presencia y la forma de la vejiga natatoria) y de la orientación del cuerpo del pez con respecto al haz de sonido transmitido (Hazen y Horne, 2003; Simmonds y MacLennan, 2005). Las mediciones de TS requieren la extracción de blancos acústicos individuales (trazas de ecos individuales resueltos mediante el algoritmo ST). Y para aumentar la solidez de los resultados, se rastrearon ecos sucesivos individuales de cada pez para determinar el TS medio en un intervalo de pings (algoritmo TT o FT) (Figura 2).

TS is a logarithmic function of the backscattering cross-section (m^2) that depends primarily on the internal physiology (mostly the presence and the shape of the swim bladder) and body orientation of the fish with regard to the transmitted sound beam (Hazen and Horne, 2003; Simmonds and MacLennan, 2005). TS measurements require the extraction of acoustic single targets (resolvable single echo traces using ST algorithm). And to increase the robustness of the results, single successive echoes of each individual fish were tracked to determine the mean fish TS over a range of pings (TT or FT algorithm) (Figure 2).

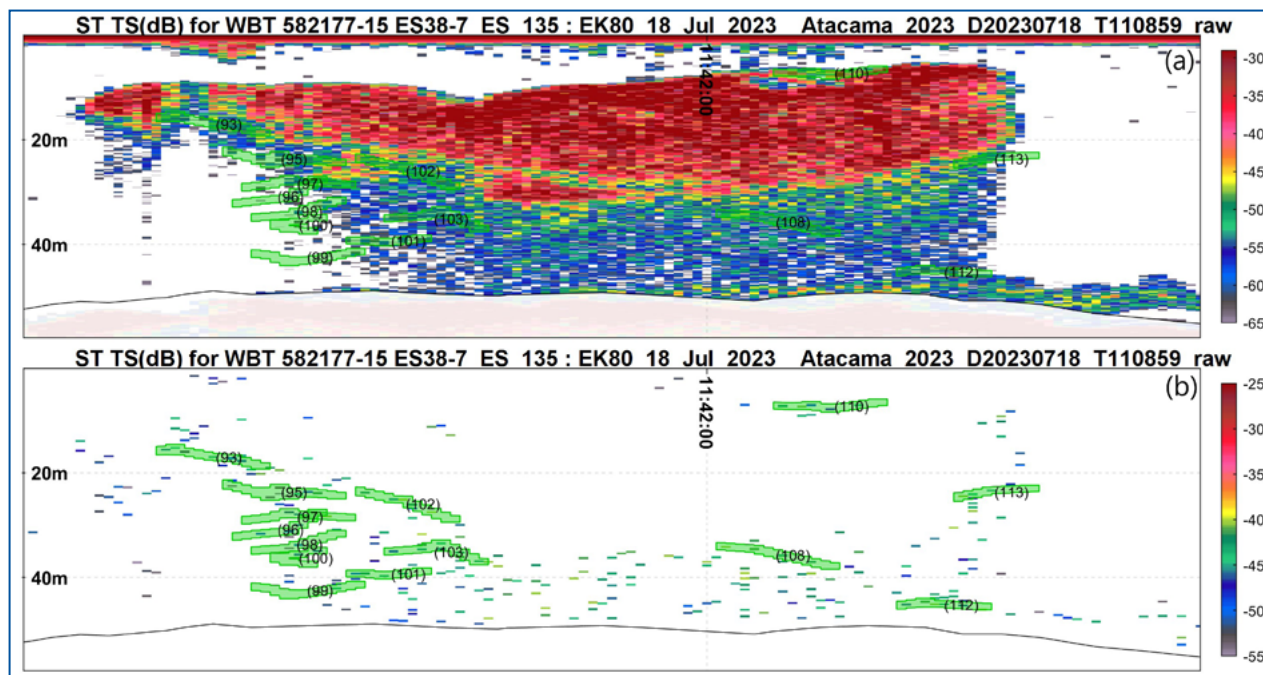


Figura 2. (a) El ecograma (Sv) muestra la presencia de un cardumen de anchoveta. La línea negra continua marca la zona de exclusión (fondo marino). (b) El algoritmo Single Target detecta peces individuales en el ecograma, representado en dB. Además, el algoritmo Target Tracked del programa ESP3 permite el seguimiento continuo y la identificación de los peces insonificados, indicado por las regiones verdes.

Todas las mediciones de TS se compensaron en función de la posición del objetivo detectado en el haz. Sólo se conservaron las trayectorias que abarcaban un mínimo de cuatro pings. La cohesión de los peces seleccionados se inspeccionó visualmente con una herramienta de comprobación de trayectos desarrollada en el ESP3. El TS medio de cada pez rastreado se calculó en el dominio lineal (Ecuación 1).

$$TS_f = 10 \cdot \log_{10}(\overline{\sigma_{bs}}) \quad (1)$$

La estimación del tamaño de los peces mediante métodos acústicos está bien establecida en la ciencia pesquera (Love, 1971; Simmonds y MacLennan, 2005). El TS es un indicador del tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005), pero también está influenciado por las especies, debido a las diferencias en la relación entre el tamaño del cuerpo y el tamaño de la vejiga (Simmonds y MacLennan, 2005), y el comportamiento natatorio (por ejemplo, el ángulo de inclinación) de la especie o del individuo (Nielsen *et al.*, 1999). Para traducir el TS en medidas de longitud (cm) más intuitivas que el decibelio (Boswell *et al.*, 2007) se convierte utilizando relaciones empíricas TS-longitud,

Figure 2. (a) The echogram (Sv) shows the presence of an Peruvian anchoveta school. The continuous black line indicates the exclusion zone (seafloor). (b) The Single Target algorithm detects individual fish in the echogram, represented in dB. Additionally, the Target Tracked algorithm of the ESP3 program allows for continuous tracking and identification of insonified fish, indicated by the green regions.

All TS measurements were compensated for the position of the detected target in the beam. Only tracks encompassing a minimum of four pings were retained. The cohesiveness of the selected tracks was inspected visually within a checking tracks tool developed in ESP3. The mean TS of each fish track was calculated in the linear domain (Equation 1).

Fish size estimation through acoustic approaches is well established in fisheries science (Love, 1971; Simmonds and MacLennan, 2005). TS is an indicator of fish size (Simmonds and MacLennan, 2005) but is also influenced by species, due to differences in ratios of body size to bladder size (Simmonds and MacLennan, 2005), and swimming behavior (e.g. tilt angle) of the species or individual (Nielsen *et al.*, 1999). To translate TS into more intuitive length measurements (cm) than the decibel (Boswell *et al.*, 2007) it is converted using empirical TS-length relationships, which often exist for specific species (Simmonds and MacLennan, 2005; Castillo *et al.*, 2022). The calculation is

que a menudo existen para especies específicas (Simmonds y MacLennan, 2005; Castillo *et al.*, 2022). El cálculo se basa en la inversa de las siguientes ecuaciones:

$$TS_f = m \cdot \log_{10}(L, cm) + b \quad (2)$$

Aquí, L representa la longitud total del pez (cm), TS es el blanco individual y f es la frecuencia de transmisión del sonido (38 kHz). Los valores b (71.352) y m (18.134) son parámetros específicos de la anchoveta (Castillo *et al.*, 2022). Por lo tanto, la reformulación de la ecuación (2) para obtener longitudes desconocidas a partir de TS conocidas se convierte en:

$$L, cm = 10^{\left(\frac{TS_{38} + 71.52}{18.134}\right)} \quad (3)$$

Las distribuciones de frecuencia de las longitudes de los blancos se exportaron (Excel) desde el ecograma y se categorizaron en longitudes (clases de tallas de 0,5 cm). Para garantizar estimaciones precisas, se empleó el método de remuestreo bootstrap con 1000 repeticiones (Hesterberg, 2011). El lenguaje de programación R facilitó el análisis bootstrap, lo que implicó la creación de una función para calcular la estadística de interés y el uso de la función *boot()* de la librería *boot* (Witten y James, 2013). A partir de los datos del estudio se calculó un resumen de la distribución por longitudes de la anchoveta basado en los distintos métodos algorítmicos utilizados. Para comparar los datos de longitud entre los distintos algoritmos (algoritmos ST y TT), se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Todos los análisis estadísticos se realizaron con RStudio (RStudio *et al.*, 2020).

RESULTADOS

Distribución espacial y estimación del tamaño de la anchoveta

Espacialmente, la anchoveta se observó formando cardúmenes desde Chañaral hasta la zona norte del puerto de Huasco. Los ecogramas evidenciaron principalmente agregaciones de baja densidad, con una notable concentración de señales de alta energía entre Carrizal Bajo y Huasco, así como densas agregaciones cerca del fondo marino. Se extrajeron un total

based on the inverse of the following equations:

Here, L represents the total length of the fish (cm), TS is the Target Strength, and f is the sound transmission frequency (38 kHz). The values b (71.352) and m (18.134) are specific parameters for Peruvian anchoveta (Castillo *et al.*, 2022). Reformulation of equation (2) to gain unknown lengths from known TS therefore

becomes:

Frequency distributions of target lengths were exported (Excel) from the echogram and categorized into length (0.5 cm size classes). To ensure accurate estimates, the bootstrap re-sampling method with 1000 repetitions was employed (Hesterberg, 2011). The R programming language facilitated the bootstrap analysis, involving the creation of a function for computing the statistic of interest and using the *boot()* function from the *boot* library (Witten and James, 2013). A summary of the Peruvian anchoveta size distribution was calculated from the survey data based on the different algorithmic methods used. To compare length data between the different algorithms (ST and TT algorithms), Kruskal-Wallis test were used. All statistical analyses were conducted using RStudio (RStudio *et al.*, 2020).

RESULTS

Spatial distribution and size estimation of Peruvian anchoveta

Spatially, the Peruvian anchoveta was observed shoaling from Chañaral to the area north of the port of Huasco. Echograms primarily revealed low-density aggregations, with a notable concentration of high-energy signals between Carrizal Bajo and Huasco, as well as dense aggregations near the seabed. A total

de 318 puntos de datos de TS-Longitud, 294 del algoritmo de recuento de ecos de blancos individuales y 24 del algoritmo de blancos rastreados. A continuación, estos valores de TS se transformaron mediante la ecuación TS-Longitud, lo que permitió calcular las longitudes de anchoveta correspondientes (Figura 3).

of 318 TS-Length data points were extracted, 294 from the Single Target echo-counting algorithm and 24 from the Tracked Target algorithm. These TS values were then transformed using the TS-Length equation, allowing for the calculation of the corresponding Peruvian anchoveta lengths (Figure 3).

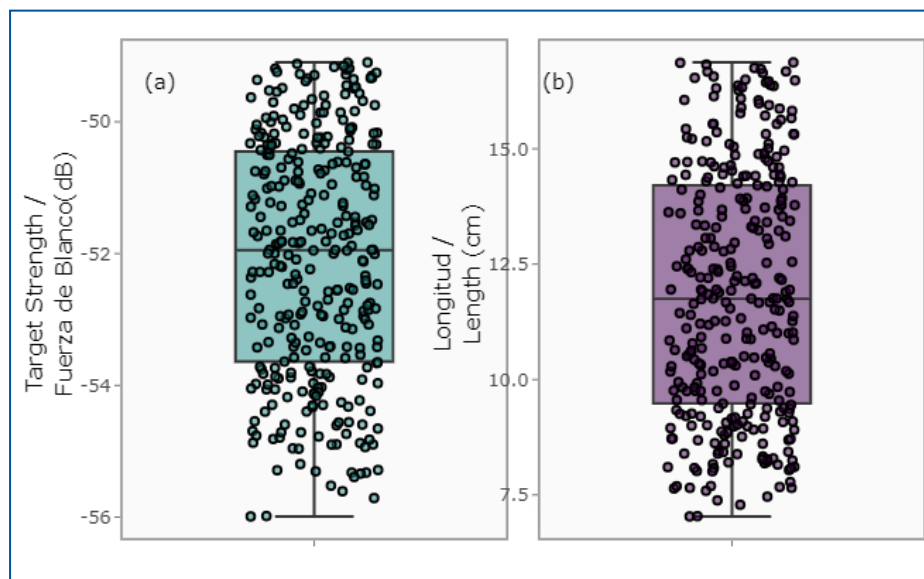


Figura 3. (a) Diagrama de cajas que muestra la distribución de los valores de la Fuerza de Blanco (TS, dB) de la anchoveta, destacando el rango, la mediana y la variabilidad de los valores de TS en toda la zona de estudio. (b) Diagrama de cajas que muestra la distribución de las longitudes (cm) de anchoveta obtenidos mediante los algoritmos acústicos.

Figure 3. (a) Boxplot showing the distribution of Target Strength (TS, dB) values for Peruvian anchoveta, highlighting the range, median, and variability of TS values across the entire study area. (b) Boxplot showing the distribution of Peruvian anchoveta lengths (cm) obtained using the acoustic algorithms

La Fuerza de Blanco (TS) osciló entre un valor mínimo de -55.99 dB y un máximo de -49.1 dB, con una mediana de -51.95 dB. Esto indica una distribución relativamente simétrica, con valores concentrados cerca del extremo inferior del intervalo. La desviación típica de 1.81 indica una variabilidad moderada de los datos. En cuanto a la longitud, el valor mínimo fue de 7.03 cm, el máximo de 16.87 cm y la mediana de 9.5 cm, con una media de 11.75 cm. La distribución de la longitud de la anchoveta muestra una dispersión más pronunciada, con la mayoría de los valores en el rango inferior y medio, aunque algunos valores mayores contribuyen a la media superior. La desviación típica de 2.67 refleja una mayor variabilidad en los datos de longitud en comparación con el TS, lo que indica una mayor dispersión.

Profundidad y distribución por tallas de anchovetas

La profundidad de los ecos de las anchovetas se localizó entre 3.92 y 43.95 m. Esta variabilidad en la profundidad, combinada con la transformación de los ecos acústicos en datos de tamaño, revela que las anchovetas de mayor longitud son capaces de

The Target Strength (TS) ranged from a minimum value of -55.99 dB to a maximum of -49.1 dB, with a median of -51.95 dB. This indicates a relatively symmetric distribution, with values concentrated near the lower end of the range. The standard deviation of 1.81 suggests moderate variability in the data. For length, the minimum value was 7.03 cm, the maximum was 16.87 cm, and the median was 9.5 cm, with a mean of 11.75 cm. The distribution of Peruvian anchoveta length shows a more pronounced spread, with most values falling in the lower to middle range, although some larger values contribute to the higher mean. The standard deviation of 2.67 reflects greater variability in the length data compared to TS, indicating a wider spread.

Depth and size distribution of anchovies

The depth of the echoes ranged from 3.92 to 43.95 m. This variability in depth, combined with the transformation of acoustic echoes into size data, reveals that longer Peruvian anchoveta are capable of inhabiting deeper coastal regions, highlighting a

habitar regiones costeras más profundas, lo que pone de relieve una posible adaptación fisiológica a estos ambientes (Figura 4).

potential physiological adaptation to these environments (Figure 4).

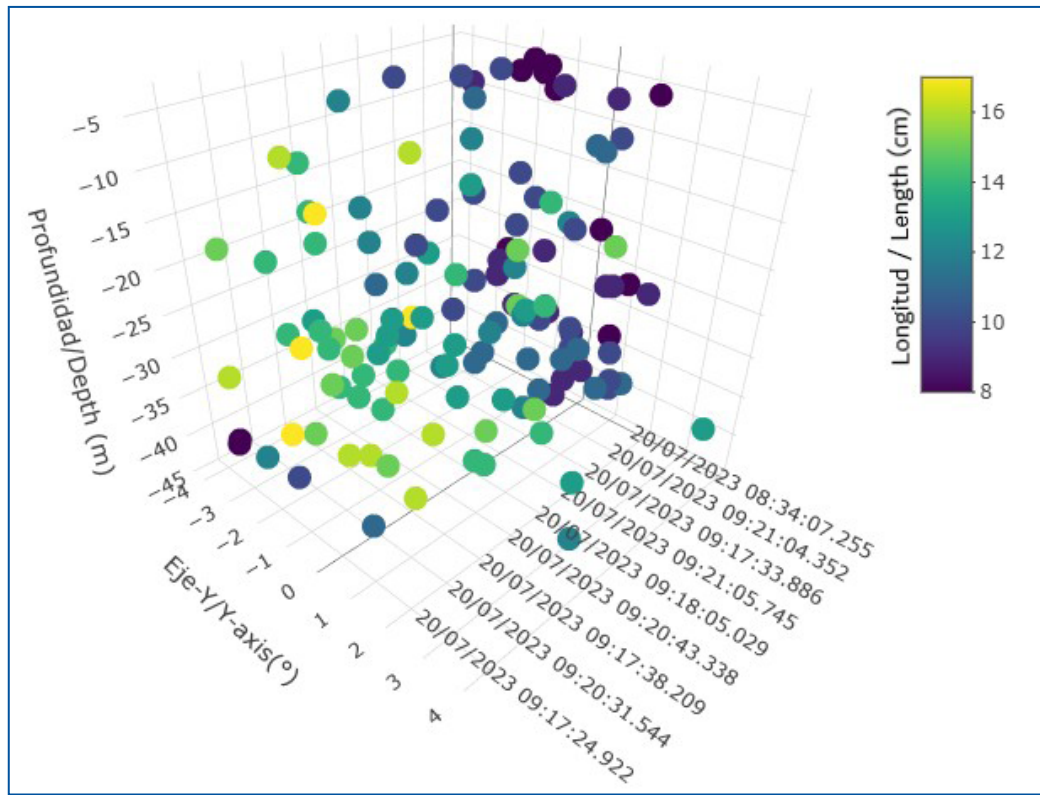


Figura 4. Longitud (cm) de anchoveta mediante el uso de algoritmos acústicos. El eje x representa la fecha-hora, indicando la dirección del buque, el eje y indica estribor (+) y babor (-), y el eje z representa la profundidad (m). No se observó ninguna tendencia significativa de las longitudes en función de la profundidad ($r^2=0.02$).

Figure 4. Acoustic Peruvian anchoveta fish size (cm). The x-axis represents date-time indicates the direction of the vessel, the y-axis indicates starboard (+) and port (-) and the z-axis represents depth (m). No significant trend in TS according to depth was observed ($r^2=0.02$).

Distribución del tamaño de la anchoveta y comparación de algoritmos

La estructura de longitudes de las anchovetas, estimada mediante acústica utilizando el algoritmo Single Target, mostró una distribución unimodal, con peces de entre 8.5 y 16 cm y una talla media de 11.89 ± 1.18 cm (CV: 4.0%) (Figura 5). En cambio, el algoritmo Tracked Target identificó anchovetas dentro de un rango más estrecho de 9 a 14 cm, con un tamaño medio de 11.72 ± 0.94 cm (CV: 3.0%). En particular, más del 70% de los ecos acústicos correspondían a peces de tamaños comprendidos entre 8.5 y 14.5 cm. El análisis estadístico no evidenció diferencias significativas en las estimaciones de las longitudes promedio entre los dos algoritmos (prueba de Kruskal-Wallis, valor $p > 0.05$).

Peruvian anchoveta size distribution and algorithm comparison

The size structure of anchovies, estimated through acoustics using the Single Target algorithm, exhibited a unimodal distribution, with fish ranging from 8.5 to 16 cm and a mean size of 11.89 ± 1.18 cm (CV: 4.0%) (Figure 5). In contrast, the Tracked Target algorithm identified anchovies within a narrower range of 9 to 14 cm, with a mean size of 11.72 ± 0.94 cm (CV: 3.0%). Notably, more than 70% of the acoustic echoes corresponded to fish sizes between 8.5 and 14.5 cm. Statistical analysis revealed no significant difference in the mean size estimates between the two algorithms (Kruskal-Wallis Test, p -value > 0.05).

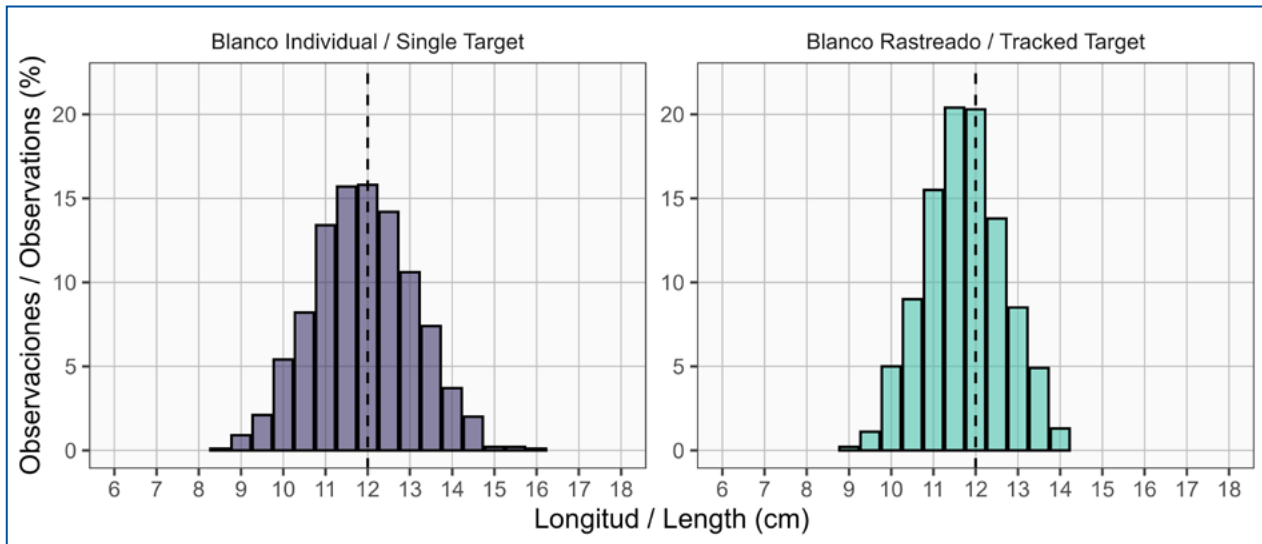


Figura 5. Histogramas que ilustran la longitud de los ecos de anchoveta utilizando los algoritmos de blancos individuales (ST) y blancos rastreados de peces (TT). Las líneas discontinuas representan la longitud media de madurez (juvenil) (< 12 cm de longitud total). Los datos se sometieron a bootstrapping con 1000 simulaciones.

Figure 5. Histograms showing the echo length of Peruvian anchoveta derived from the single target (ST) and tracked target (TT) algorithms. Dashed lines represent the mean maturity size (juvenile) (< 12 cm total length). The data were bootstrapped with 1000 simulations.

La **Tabla 3** muestra un resumen de la distribución de longitudes de la anchoveta estimada mediante métodos acústicos. Los datos, obtenidos a partir de 1000 simulaciones bootstrap por algoritmo, permiten comparar los resultados entre dos enfoques distintos: el algoritmo de blancos individuales y el algoritmo de objetivos o blancos rastreados.

Table 3 presents a summary of the length distribution of Peruvian anchoveta estimated using acoustic methods. The data, obtained from 1,000 bootstrap simulations per algorithm, allow for a comparison between two different approaches: the single target algorithm and the tracked target algorithm.

Tabla 3. Resumen de la distribución de tallas de anchoveta obtenida mediante 1000 simulaciones bootstrap, según el algoritmo empleado.

Table 3. Summary of Peruvian anchoveta size distribution obtained from 1,000 bootstrap simulations, according to the algorithm used.

Estadísticas-Algoritmo / Statistics/Algorithm	Blancos Individuales / Single Target	Blancos Rastreados / Tracked Target
Frecuencia / Frequency (kHz)	38	38
Media± d.e. / Mean± s.d (cm)	11.89±1.18	11.72±0.94
Rango / Range (cm)	8.5-16.0	9.0-14.0
Moda / Mode (cm)	12.0	11.5
Juveniles / Juveniles (%)	45.8	51.2
Coefficiente de variación / Coefficient variation (%)	4.0	3.0

DISCUSIÓN

Se encontró un gran cardumen de anchovetas durante el muestreo acústico aleatorio, este evento estocástico generó un valor atípico significativo en los datos (aumento de la densidad acústica media). Asimismo, existen muchas dificultades para calcular las estimaciones de TS de los cardúmenes densos

DISCUSSION

A large school of Peruvian anchoveta was encountered during the random sampling acoustic, this stochastic event created a significant outlier in the data (increasing mean acoustic density). Likewise, there are many difficulties in calculating TS estimates for dense schools due to sound attenuation (Simmonds and

debido a la atenuación del sonido (Simmonds y MacLennan, 2005). Por lo tanto, se excluyó este evento de todos los análisis posteriores, para evitar sesgos en nuestras estimaciones de densidad de peces (Sawada *et al.*, 1993; Gauthier y Rose, 2001). El modelo de dispersión más simple para un grupo de peces (o cualquier grupo de dispersores idénticos) asume que los peces están suficientemente espaciados para que la dispersión múltiple y la atenuación no sean factores que causen respuestas incoherentes (Love *et al.*, 2016).

TS como indicador del tamaño de los peces

La Fuerza de Blanco (TS) es un parámetro crítico en la acústica pesquera, utilizado a menudo para estimar la longitud, la densidad, la abundancia y la biomasa de los peces. El TS refleja las propiedades acústicas de un pez, que varían en función de factores como su tamaño, la orientación, la especie y las condiciones ambientales (Simmonds y MacLennan, 2005). La relación entre el TS y la longitud (L) de los peces suele modelarse mediante la ecuación $TS = m \log_{10}(L) + b$, donde m y b son constantes específicas de cada especie que ayudan a establecer la relación entre ambas variables. Este método de modelización permite estimar el tamaño de los peces a partir de mediciones acústicas. En el presente estudio, los parámetros específicos de la anchoveta $b = -71.52$ y $m = 18.134$ desempeñan un papel fundamental en la precisión del modelo utilizado para estimar la longitud (L) de los peces. Estas constantes, derivadas específicamente para *Engraulis ringens* a partir de datos empíricos (Castillo *et al.*, 2022), son cruciales para garantizar la fiabilidad de las estimaciones de longitud de los peces basados en mediciones acústicas a 38 kHz. Sin embargo, es importante señalar que este modelo es específico para cada especie y debe recalibrarse para otras especies a fin de garantizar estimaciones de tamaño precisas.

Aunque el TS es un valioso indicador del tamaño de los peces pelágicos, su precisión depende de varios factores específicos de cada especie, de las técnicas de medición y de las condiciones ambientales. Comprender y abordar estas variables es esencial para obtener datos fiables de los estudios acústicos y tomar decisiones eficaces de gestión pesquera. Por otra parte, el TS presenta varias limitaciones que pueden introducir variabilidad y posibles sesgos en las mediciones. Por ejemplo, factores como los atributos de los peces (orientación, madurez, estado fisiológico, presencia de vejiga natatoria), las diferencias específicas

MacLennan, 2005). Therefore, we excluded this event from all subsequent analyses to avoid bias in our estimates of fish density (Sawada *et al.*, 1993; Gauthier and Rose, 2001). The simplest dispersion model for a group of fish (or any group of identical dispersers) assumes that the fish are sufficiently spaced so that multiple scattering and attenuation are not factors causing incoherent responses (Love *et al.*, 2016).

TS as proxy for fish size

Target Strength (TS) is a critical parameter in fisheries acoustics, often used to estimate fish size, density, abundance, and biomass. TS reflects the acoustic properties of a fish, which vary with factors such as fish size, orientation, species, and environmental conditions (Simmonds and MacLennan, 2005). The relationship between TS and fish length (L) is commonly modeled using the equation $TS = m \log_{10}(L) + b$, where m and b are species-specific constants that help establish the relationship between the two variables. This modeling approach allows for the estimation of fish size from acoustic measurements. In the present study, the Peruvian anchoveta-specific parameters $b = -71.52$ and $m = 18.134$ play a fundamental role in the accuracy of the model used to estimate fish length (L) from TS. These constants, derived specifically for *Engraulis ringens* from empirical data (Castillo *et al.*, 2022), are crucial in ensuring the reliability of fish size estimates based on acoustic measurements at 38 kHz. However, it is important to note that this model is species-specific and must be recalibrated for other species to ensure accurate size estimations.

While TS is a valuable proxy for fish size in pelagic species, its accuracy is influenced by various species-specific factors, measurement techniques, and environmental conditions. Understanding and addressing these variables is essential for obtaining reliable acoustic survey data and making effective fisheries management decisions. On the other hand, TS comes with several limitations that can introduce variability and potential bias in the measurements. For instance, factors such as fish attributes (orientation, maturity, physiological condition, swim bladder presence), species-specific differences (unique TS-length relationships), environmental conditions (depth, pressure, mixed species assemblages), measurement techniques (echo overlap, type of acoustic equipment), and behavioral factors (swimming patterns, schooling behavior) all play a role in TS accuracy (Simmonds and MacLennan, 2005; Doray *et al.*, 2016;

de cada especie (relaciones únicas entre TS y longitud), las condiciones ambientales (profundidad, presión, conjuntos de especies mixtas), las técnicas de medición (superposición de ecos, tipo de equipo acústico) y los factores de comportamiento (patrones de natación, comportamiento de cardumen) influyen en la precisión del TS (Simmonds y MacLennan, 2005; Doray *et al.*, 2016; Castillo *et al.*, 2022). Sin embargo, es importante señalar que estos factores no se analizaron en el presente estudio, lo que puede haber introducido un sesgo en los resultados.

Estas limitaciones ponen de manifiesto la complejidad de utilizar el TS como indicador del tamaño de los peces. Para garantizar unas estimaciones más precisas, es necesario tener muy en cuenta estos factores y recalibrar a menudo el modelo para especies y ambientes específicos. Además, la incorporación de variables adicionales como las relaciones talla-peso, la profundidad y otras condiciones ambientales puede mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa y distribución, contribuyendo en última instancia a unas prácticas de gestión pesquera más sostenibles.

Retos y avances en la estimación acústica del tamaño de los peces

La estimación del tamaño de los peces mediante métodos acústicos presenta varios retos importantes, que pueden clasificarse en factores técnicos, biológicos y medioambientales: (i) La precisión de la estimación del tamaño de los peces depende en gran medida de la Fuerza de Blanco (TS), que está influida por la fisiología, la orientación y la profundidad de los peces. Las variaciones del TS debidos a estos factores pueden dar lugar a importantes sesgos en la estimación del tamaño. Es fundamental calibrar correctamente los instrumentos acústicos. Los métodos de calibración, como el uso de esferas de metal e hidrófonos, han mostrado variabilidad en los resultados debido a las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales de las esferas (Knudsen, 2006). (ii) La elevada diversidad de especies, especialmente en las regiones tropicales, complica la conversión de las intensidades de los ecos en densidad de biomasa. Las distintas especies y tamaños reflejan el sonido de manera diferente, y los conjuntos de especies mixtas requieren una cuidadosa consideración de las relaciones TS-Longitud específicas de cada especie. La orientación de los peces y sus patrones de natación pueden afectar significativamente a la precisión de las mediciones acústicas. Por ejemplo,

Castillo *et al.*, 2022). However, it is important to note that these factors were not analyzed in the present study, which may have introduced a bias in the results.

These limitations underscore the complexity involved in using TS as a proxy for fish size. To ensure more accurate estimates, it is necessary to carefully consider these factors and often recalibrate the model for specific species and environments. Furthermore, incorporating additional variables such as length-weight relationships, depth, and other environmental conditions into management strategies can enhance the precision of biomass and distribution estimates, ultimately contributing to more sustainable fisheries management practices.

Challenges and advancements in acoustic fish size estimation

Estimating fish size using acoustic methods presents several significant challenges, which can be categorized into technical, biological, and environmental factors: (i) The accuracy of fish size estimation heavily relies on the Target Strength (TS), which is influenced by fish physiology, orientation, and depth. Variations in TS due to these factors can lead to significant biases in size estimation. It is essential to correctly calibrate the acoustic instruments. Calibration methods, such as the use of metal spheres and hydrophones, have shown variability in results due to environmental conditions and the properties of the sphere materials (Knudsen, 2006). (ii) High species diversity, especially in tropical regions, complicates the conversion of echo intensities to biomass density. Different species and sizes reflect sound differently, and mixed species assemblages require careful consideration of species-specific TS-Length relationships. Fish orientation and swimming patterns can significantly impact the accuracy of acoustic measurements. For instance, fish swimming close to nets in circular motions can lead to underestimation of their length (Letessier *et al.*, 2022). (iii) Variations in water temperature, salinity, and other hydrographic conditions can affect the acoustic properties of the medium, influencing the accuracy of size estimates (Knudsen, 2006).

However, advancements in fisheries acoustics are continuously addressing these challenges, with evolving technologies that offer significant improvements in species identification and size classification (Chu, 2011). The introduction of multiple frequencies represented a qualitative step in marine community studies,

los peces que nadan cerca de las redes con movimientos circulares pueden llevar a subestimar su longitud (Letessier *et al.*, 2022). (iii) Las variaciones en la temperatura del agua, la salinidad y otras condiciones hidrográficas pueden afectar a las propiedades acústicas del medio, influyendo en la precisión de las estimaciones de tamaño (Knudsen, 2006).

Sin embargo, los avances en la acústica pesquera están abordando continuamente estos retos, con tecnologías en evolución que ofrecen mejoras significativas en la identificación de especies y la clasificación por tallas (Chu, 2011). La introducción de frecuencias múltiples representó un paso cualitativo en los estudios de comunidades marinas, facilitando la diferenciación de objetivos acústicos en categorías basadas en respuestas de frecuencia relativa (Korneliussen, 2018). Estos avances, incluido el uso de tecnología de banda ancha (Demer *et al.*, 2017), son especialmente prometedores para potenciar la discriminación de especies y mejorar la clasificación de las clases de tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005; Benoit-Bird y Waluk, 2020). Las tecnologías de banda ancha, con su amplio espectro de frecuencias, han demostrado su eficacia para distinguir entre especies y clasificar con precisión el tamaño de los peces (Stanton *et al.*, 2012; Bassett *et al.*, 2018; Kubilius *et al.*, 2020, 2023; Hasegawa *et al.*, 2021; Loranger *et al.*, 2022). Estas mejoras tecnológicas ofrecen un valioso potencial para superar algunas de las limitaciones de la estimación del tamaño de los peces y contribuir a la realización de estudios acústicos más precisos y fiables.

Este estudio proporcionó información valiosa sobre la distribución del tamaño de los peces en los distintos lugares de la zona estudiada. La utilización de datos acústicos de banda estrecha nos permitió estimar con precisión el tamaño de los peces y arrojar luz sobre su densidad y variabilidad. Este estudio pone de relieve el papel fundamental de la tecnología acústica en la obtención de datos esenciales sobre las poblaciones de peces, especialmente en situaciones en las que el muestreo biológico resulta difícil o poco práctico. Como método no invasivo y eficaz, la hidroacústica ofrece una alternativa oportuna y confiable para la evaluación de poblaciones de peces en la investigación contemporánea, contribuyendo a subsanar las limitaciones de los métodos de muestreo tradicionales.

facilitating the differentiation of acoustic targets into categories based on relative frequency responses (Korneliussen, 2018). These advancements, including the use of broadband technology (Demer *et al.*, 2017), are particularly promising for enhancing species discrimination and improving the classification of fish size classes (Simmonds and MacLennan, 2005; Benoit-Bird and Waluk, 2020). Broadband technologies, with their wide frequency spectrum, have proven effective in distinguishing between species and accurately classifying fish sizes (Stanton *et al.*, 2012; Bassett *et al.*, 2018; Kubilius *et al.*, 2020, 2023; Hasegawa *et al.*, 2021; Loranger *et al.*, 2022). These technological improvements offer valuable potential to overcome some of the limitations in fish size estimation and contribute to more precise and reliable acoustic surveys.

Our study provided valuable insights into the fish size distribution across different sites within the study area. By utilizing acoustic narrowband data, we were able to estimate fish sizes with accuracy, shedding light on fish density and size variability. This study highlights the critical role of acoustic technology in obtaining essential fish population data, especially in situations where biological sampling is difficult or impractical. As a non-invasive and effective method, hydroacoustics offers a timely and reliable alternative for fish population assessment in contemporary research, helping to address the limitations of traditional sampling methods.

CONCLUSIONS

This study demonstrates the viability of directly converting acoustic signals into fish length estimates. By employing fish identification algorithms alongside an acoustic energy-to-length conversion model, we successfully estimated the length distribution of anchovies. The data derived from the Single Target algorithm revealed a distribution of anchovies ranging from 8.5 to 16 cm, with a mode of 12.0 cm, while the Tracked Target algorithm identified a length range of 9 to 14 cm, with a mode of 11.5 cm. These findings highlight the effectiveness of hydroacoustic methods in estimating fish size distribution, particularly in areas where traditional biological sampling with fishing nets is not feasible. Moreover, this study provides valuable insights into the distribution patterns of Peruvian anchoveta sizes, laying the groundwork for future surveys and enhancing our understanding of fish population dynamics in environments

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la viabilidad de convertir directamente las señales acústicas en estimaciones de la longitud de los peces. Empleando algoritmos de identificación de peces junto con un modelo de conversión de energía acústica en longitud, se estimó con éxito la distribución de la longitud de las anchovetas. Los datos derivados del algoritmo de blancos individuales revelaron una distribución de anchovetas que oscilaba entre 8.5 y 16 cm, con una moda de 12.0 cm, mientras que el algoritmo de blancos rastreados identificó un rango de longitudes de 9 a 14 cm, con una moda de 11.5 cm. Estos resultados ponen de relieve la eficacia de los métodos hidro acústicos para estimar la distribución del tamaño de los peces, sobre todo en áreas donde no es factible el muestreo biológico tradicional con redes de pesca. Además, este estudio aporta valiosos datos sobre los patrones de distribución de las tallas de anchoveta, sentando las bases para futuros estudios y mejorando la comprensión de la dinámica de las poblaciones de peces en ambientes donde el muestreo directo presenta dificultades.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos el más sincero agradecimiento al Departamento de Evaluaciones Directas (DED) del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) por su invaluable apoyo y sus comentarios motivadores, que nos impulsaron al inicio de este proyecto. Nuestro agradecimiento especial a Sergio Lillo, exjefe del Departamento de Evaluaciones Directas, por su destacada labor de liderazgo y orientación. Asimismo, se expresa profunda gratitud al Gobierno Regional de Atacama, Chile, por su constante colaboración y asistencia a lo largo de esta iniciativa. Un agradecimiento muy especial también a la dedicada tripulación de la embarcación pesquera Don Pancracio por sus contribuciones indispensables.

where direct sampling is challenging.

ACKNOWLEDGEMENTS

We extend our sincerest gratitude to the Direct Evaluations Department (DED) of the Fisheries Development Institute (IFOP) for their invaluable support and motivating feedback, which inspired us at the beginning of this project. Our special thanks to Sergio Lillo, former head of the Direct Assessments Department, for his outstanding leadership and guidance. We also wish to express our deep gratitude to the Regional Government of Atacama, Chile, for their continuous collaboration and assistance throughout this initiative. A very special thank you as well to the dedicated crew of the fishing vessel Don Pancracio for their indispensable contributions.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Alheit, J. and Niquen, M. (2004). Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, 60(2-4), pp.201–222. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.006>
- Báez, J.C., Gimeno, L. and Real, R. (2021). North Atlantic Oscillation and Fisheries Management during Global Climate Change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 31, pp. 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09645-z>
- Balk, H. and Lindem, T. (2000). Amélioration des détections de poissons à partir des données de sonar à double faisceau. *Aquatic Living Resources*, 13(5), pp. 297–303. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(00\)01079-2](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(00)01079-2)
- Bassett, C., De Robertis, A. and Wilson, C.D. (2018). Broad-band echosounder measurements of the frequency response of fishes and euphausiids in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, 75(3), pp. 1131–1142. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx204>
- Benoit-Bird, K.J. and Waluk, C.M. (2020). Exploring the promise of broadband fisheries echosounders for species discrimination with quantitative assessment of data processing effects. *Journal of the Acoustical Society of America*, 147(1), pp. 411–427. <https://doi.org/10.1121/10.0000594>
- Bertrand, A., Gerlotto, F., Bertrand, S., Gutiérrez, M., Alza, L., Chipollini, A., Díaz, E., Espinoza, P., Ledesma, J., Quesquén, R., Peraltilla, S. and Chavez, F. (2008). Schooling behaviour and environmental forcing in relation to anchoveta distribution: An analysis across multiple spatial scales. *Progress in Oceanography*, 79(2), pp. 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.018>
- Bertrand, A., Segura, M., Gutierrez, M. and Vasquez, L. (2004). From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries*, 5(4), pp. 296–316. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x>
- Boswell, K.M., Wilson, M.P. and Wilson, C.A. (2007). Hydroacoustics as a tool for assessing fish biomass and size distribution associated with discrete shallow water estuarine habitats in Louisiana. *Estuaries and Coasts*, 30(4), pp. 607–617. <https://doi.org/10.1007/BF02841958>
- Canales, C.M., Adasme, N.A., Cubillos, L.A., Cuevas, M.J. and Nazareth Sánchez (2018). Long-time spatio-temporal variations in anchovy (*Engraulis ringens*) biological traits off northern Chile: an adaptive response to long-term environmental change? *ICES Journal of Marine Science*, 75(6), pp.1908–1923. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy082>
- Castillo, J., Saavedra, A., Leiva, F., Legua, J., La Cruz, L., Alegría, N., Núñez, S., Silva, J. and Sepulveda, A. (2022). *Estimación de la fuerza de blanco (TS) para las unidades demográficas de anchoveta a nivel nacional 2020-2019*. Chile: Instituto de Fomento Pesquero, p.170.
- Castillo, P.R., Niquen, M., Cruz, L.L., Guevara-Carrasco, R. and Cuadros, G. (2021). Migration behavior of anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Northern Humboldt Current System between September 2019 and September 2020. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(5), pp.702–716. <http://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2669>
- Chavez, F.P. and Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), pp.80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chu, D. (2011). Technology evolution and advances in fisheries acoustics. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(3). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2188>
- De Robertis, A. and Higginbottom, I. (2007). A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES Journal of Marine Science*, 64(6), pp.1282–1291. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm112>
- Demer, D.A., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fassler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L.T., Jech, J.M., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G.J., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S. and Stienessen, S. (2015). *Calibration of acoustic instruments. International Council for the Exploration of the Sea (ICES) Copenhagen, Denmark, Copenhagen, Denmark: International Council for the Exploration of the Sea (ICES) C, p.133*. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-185>
- Doray, M., Berger, L., Le Bouffant, N., Yves Coail, J., Vacherot, J.-P., De La Bernardie, X., Morinière, P., Lys, E., Schwab, R. and Petitgas, P. (2016). A method for controlled target strength measurements of pelagic fish, with application to European anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *Ices Journal of Marine Science*, 73(8), pp.1987–1997. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw084>
- Foote, K.G. (1987). Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(3), pp. 981–987. <https://doi.org/10.1121/1.395298>
- Ganais, K. (2014). *Biology and ecology of sardines and anchovies*. CRC Press, p. 394
- Garcés, C., Niklitschek, E.J., Plaza, G., Cerna, F., Leisen, M., Toledo, P. and Barra, F. (2019). Anchoveta *Engraulis ringens* along the Chilean coast: Management units, demographic units and water masses: Insights from multiple otolith-based approaches. *Fisheries Oceanography*, 28(6), pp.735–750. <https://doi.org/10.1111/fog.12455>
- Gibson, R.N., Atkinson, A. and Gordon (2016). *Oceanography and Marine Biology*. 1st ed. [online] CRC Press. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781420094220-9/review-underwater-stereo-image-measurement-marine-biology-ecology-applications-mark-shortis-euan-harvey-dave-abdo>
- Gutiérrez, M., Swartzman, G., Bertrand, A. and Bertrand, S. (2007). Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983?2003. *Fisheries Oceanography*, 16(2), pp. 155–168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00422.x>

- Gutiérrez, T.M., Castillo, P.J., Naranjo, B.L. and Akester, M.J. (2017). Current state of goods, services and governance of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem in the context of climate change. *Environmental Development*, 22, pp. 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.en-dev.2017.02.006>
- Harrison, D.E. and Chiodi, A.M. (2015). Multi-decadal variability and trends in the El Niño–Southern Oscillation and tropical Pacific fisheries implications. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 113, pp. 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.12.020>
- Hasegawa, K., Yan, N. and Mukai, T. (2021). In situ broadband acoustic measurements of age-0 walleye pollock and pothead flounder in Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Journal of marine science and technology*, 29(2). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.1076>
- Hazen, E.L. and Horne, J.K. (2003). A method for evaluating the effects of biological factors on fish target strength. *ICES Journal of Marine Science*, 60(3), pp. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00053-5)
- Hernández-Santoro, C., Landaeta, M.F. and Jorge Castillo Pizarro (2018). Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile. *Fisheries Oceanography*, 28(3), pp. 241–255. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00053-5)
- Hesterberg, T. (2011). Bootstrap. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 3(6), pp. 497–526. <https://doi.org/10.1002/wics.182>
- Hilborn, R. and Walters, C.J. (2013). Quantitative Fisheries Stock Assessment. *Springer eBooks*, 3(6), p. 570. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3598-0>
- Hinchliffe, C., Kuriyama, P.T., Punt, A.E., Field, J.C., Thompson, A.R., Santora, J.A., Muhling, B.A., Koenigstein, S., Hervann, P.-Y. and Tommasi, D. (2025). Long-term population trend of northern anchovy (*Engraulis mordax*) in the California Current system. *ICES Journal of Marine Science*, 82(1). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae177>
- IFOP (2025). *Programa de seguimiento de las principales pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile, entre la Región Arica–Parinacota y Coquimbo, año 2024. Subsecretaría de Economía y EMT / febrero 2025*. IFOP, p. 15.
- Knudsen, H.P. (2006). Gauging the Reliability of Acoustic Instruments for Fisheries Surveys. *Oceans*, 69, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.307044>
- Korneliusson, R.K. (2018). Fifty years of marine tag recoveries from Atlantic salmon. *ICES Cooperative Research Report*, 343, p. 110. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4542>
- Kubilius, R., Bergès, B. and Macaulay, G.J. (2023). Remote acoustic sizing of tethered fish using broadband acoustics. *Fisheries Research*, 260, p.106585. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106585>
- Kubilius, R., Macaulay, G.J. and Ona, E. (2020). Remote sizing of fish-like targets using broadband acoustics. *Fisheries Research*, 228, p.105568. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105568>
- Ladroit, Y., Escobar-Flores, P.C., Schimel, A.C.G. and O'Driscoll, R.L. (2020). ESP3: An open-source software for the quantitative processing of hydro-acoustic data. *SoftwareX*, 12, p. 100581. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100581>
- Letessier, T.B., Proud, R., Meeuwig, J.J., Cox, M.J., Hosegood, P.J. and Brierley, A.S. (2021). Estimating Pelagic Fish Biomass in a Tropical Seascape Using Echosounding and Baited Stereo-Videography. *Ecosystems*, 25(6), pp. 1400–1417. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00723-8>
- Loranger, S., Jech, M.J. and Lavery, A.C. (2022). Broadband acoustic quantification of mixed biological aggregations at the New England shelf break. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(4), pp. 2319–2335. <https://doi.org/10.1121/10.0014910>
- Love, R.H. (1971). Measurements of fish target strength: a review. *Fishery Bulletin*, 69(4), pp. 703–715.
- Love, R.H., Fialkowski, J.M. and Jagielo, T.H. (2016). Target strength distributions of Pacific sardine schools: Model results at 500 Hz to 10 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(6), pp. 4456–4471. <https://doi.org/10.1121/1.4966553>
- MacLennan, D., Fernandes, P. and Dalen, J. (2002). A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 59(2), pp. 365–369. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158>
- Nielsen, J. and Lundgren, B. (1999). Hydroacoustic *ex situ* target strength measurements on juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 56(5), pp. 627–639. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0515>
- Ñiquen, M. and Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9), pp. 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.03.001>
- Ona, E. (1999). Methodology for Target Strength measurements (With special reference to in situ techniques for fish and mikro-nekton). *ICES Cooperative Research Report*, 235(65), p. 35. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.5367>
- Ortiz, M. (2020). Pre-image population indices for anchovy and sardine species in the Humboldt Current System off Peru and Chile: Years decaying productivity. *Ecological Indicators*, 119, p. 106844. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106844>
- Øvredal, J.T. and Totland, B. (2002). The scantrol FishMeter for recording fish length, weight and biological data. *Fisheries Research*, 55(1-3), pp. 325–328. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00274-0](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00274-0)
- Palermينو, A., De Felice, A., Canduci, G., Biagiotti, I., Costantini, I., Centurelli, M. and Leonori, I. (2023). Application of an analytical approach to characterize the target strength of ancillary pelagic fish species. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42326-4>

- Reid, R.G. (2000). Report on echo trace classification. *ICES Cooperative Research Report*, 238, p. 155.
- Robotham, H., Bosch, P., Gutiérrez-Estrada, J.C., Castillo, J. and Inmaculada Pulido-Calvo (2009). Acoustic identification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks. *Fisheries Research*, 102(1-2), pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.10.015>
- RStudio, T. (2020). *Rstudio: integrated development for r. Rstudio Team*. [online] rstudio.com. Available at: <http://www.rstudio.com>
- Ryan, T.E., Downie, R.A., Kloser, R.J. and Keith, G. (2015). Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data. *ICES Journal of Marine Science*, 72(8), pp. 2482–2493. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv121>
- Sawada, K., Furusawa, M. and Williamson, N.J. (1993). Conditions for the precise measurement of fish target strength in situ. *The Journal of The Marine Acoustics Society of Japan*, 20(2), pp. 73–79. <https://doi.org/10.3135/jmasj.20.73>
- Simmonds, J. and MacLennan, D. (2025). *Fisheries acoustics: Theory and practice. Fish and Aquatic Resources*. [online] <https://books.google.cl/books?id=1w5LlIr3NdoC>. Available at: <https://books.google.cl/books?id=1w5LlIr3NdoC>
- Soule, M., Barange, M., Haakon Solli and Hampton, I. (1997). Performance of a new phase algorithm for discriminating between single and overlapping echoes in a split-beam echosounder. *ICES Journal of Marine Science*, 54(5), pp. 934–938. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1997.0270>



ARTÍCULO / ARTICLE

Lista de especies y bibliografía de eunícidos (Eunicidae: Polychaeta: Annelida) del Caribe colombiano

List of species and bibliography of eunícids (Eunicidae: Polychaeta: Annelida) from the Colombian Caribbean

Alexander Blandón-Pulgarín

0009-0001-0889-397X

dalexander.blandon@udea.edu.co

Mario H. Londoño-Mesa

0000-0001-5089-6472

marioh.londono@udea.edu.co

Recibido / Received: 27/01/2025

Aceptado / Accepted: 19/05/2025

Citación / Citation: Blandón-Pulgarín, A.; Londoño-Mesa, M.H.
2025. Lista de especies y bibliografía de eunícidos (Eunicidae:
Polychaeta: Annelida) del Caribe colombiano Bol. Invest. Mar.
Cost., 54(2): 90-99

RESUMEN

Se presenta una lista actualizada de especies de poliquetos de la familia Eunicidae registradas en el mar Caribe colombiano. La recopilación de datos se basó en investigaciones previas sobre estos organismos. Se registraron 7 géneros y 62 especies, de las cuales 54 son especies nominales y 8 fueron incluidas como "sp." en su respectivo género. Para respaldar la información se consideraron trabajos y publicaciones recientes, así como información de registros dudosos o especies no registradas en Colombia, pero sí en localidades cercanas. Además, se actualizaron los nombres aceptados según WoRMS (World Register of Marine Species) y los listados de especies más recientes.

Palabras clave: Colombia, Distribución, Diversidad, Invertebrados marinos.

ABSTRACT

An updated checklist of polychaete species belonging to the family Eunicidae reported in the Colombian Caribbean Sea is presented. The data compilation is based on previous research about these organisms. A total of 7 genera and 62 species were reported, from which 54 are nominal species, and 8 are reported as "sp." in the genus they belong to. To support the information provided, they were considered recent scientific papers and reports, as well as information about doubtful records, and species not previously reported in Colombia, but registered from nearby localities. Additionally, species names were updated according to WoRMS (World Register of Marine Species), and with the most recent species checklists

Key words: Colombia, Distribution, Diversity, Marine Invertebrates.

INTRODUCCIÓN

Los poliquetos son un grupo diverso y ampliamente distribuido de anélidos que conforman una de las clases más diversas de invertebrados marinos, con un registro fósil datado desde el Ordovícico temprano (Rouse y Pleijel, 2001). Según Amaral *et al.* (1996), es posible hallar estos organismos desde aguas someras hasta grandes profundidades en los océanos, siendo así un grupo presente en todos los fondos marinos. En la clasificación taxonómica de Polychaeta, dentro de la subclase Errantia Audouin y H. Milne Edwards, 1832, el orden Eunicida contiene la familia Eunicidae, la cual destaca como una de las más extensas en cuanto a diversidad de especies. Se estimaba que existían alrededor de 250 especies válidas distribuidas en nueve géneros reconocidos (Hartmann-Schröder y Zibrowius, 1998). Estos números han aumentado en la actualidad, debido a la propuesta de los nuevos géneros nombrados por Molina-Acevedo y Carrera-Parra (2017) y Molina-Acevedo (2018), además de la descripción de nuevas especies como *Eunice colombia* (Ardila *et al.*, 2005).

Los eunícidos se encuentran tanto en sustratos blandos como duros y, en ocasiones, establecen simbiosis con otros invertebrados marinos, principalmente con corales blandos y esponjas (Ruiz-Cancino *et al.*, 2010). Presentan sexos separados, sin dimorfismo sexual. Pueden reproducirse de diferentes maneras, pero las más comunes son: 1) el desarrollo de una forma epitoca, en la cual los ojos se agrandan y la parte posterior interna del cuerpo se transforma para contener los gametos, los cuales son liberados cuando el animal nada hacia la columna de agua, y 2) el desarrollo implica la fragmentación del cuerpo, donde solo la mitad posterior emerge para liberar los gametos en la columna de agua (Carrera-Parra y Molina-Acevedo, 2021).

Según Carrera-Parra y Molina-Acevedo (2021), los integrantes de esta familia pueden presentar una amplia gama de tamaños, desde diminutos, de solo unos pocos milímetros, hasta alcanzar varios metros de longitud, compuestos por centenares de segmentos. Este grupo exhibe una distribución geográfica muy extensa, ya que se encuentran desde regiones de aguas tropicales y subtropicales hasta polares. Debido a sus hábitos alimentarios, los eunícidos han sido clasificados como organismos de omnivoría amplia (incluyendo alimentación macró y micrófaga), resultado de la presencia de mandíbulas y maxilas

INTRODUCTION

Polychaetes are a diverse and widely distributed group of annelids that make up one of the most diverse classes of marine invertebrates, with a fossil record dating back to the early Ordovician (Rouse and Pleijel, 2001). According to Amaral *et al.* (1996), it is possible to find these organisms from shallow waters to great depths in the oceans, thus being a group present in all marine floors. In the taxonomic classification of Polychaeta, within the subclass Errantia Audouin and H. Milne Edwards, 1832, the order Eunicida contains the family Eunicidae, which stands out as one of the most extensive in terms of species diversity. It was estimated that there were around 250 valid species distributed in nine recognized genera (Hartmann-Schröder and Zibrowius, 1998). These numbers have increased today due to the proposal of new genera named by Molina-Acevedo and Carrera-Parra (2017) and Molina-Acevedo (2018), in addition to the description of new species such as *Eunice colombia* (Ardila *et al.*, 2005).

Eunicids are found in both soft and hard substrates and sometimes establishing symbiosis with other marine invertebrates, mainly with soft corals and sponges (Ruiz-Cancino *et al.*, 2010). They have separate sexes without sexual dimorphism. They can reproduce in different ways, but the most common are: 1) the development of an epitokous form, in which the eyes enlarge and the internal posterior part of the body transforms to contain the gametes, which are released when the animal swims towards the water column, and 2) the development involves the fragmentation of the body, where only the posterior half emerges to release the gametes into the water column (Carrera-Parra and Molina-Acevedo, 2021).

According to Carrera-Parra and Molina-Acevedo (2021), members of this family can exhibit a wide range of sizes, from tiny, only a few millimeters, to several meters in length, composed of hundreds of segments. This group exhibits a very extensive geographical distribution, as they are found from tropical and subtropical waters to polar regions. Due to their feeding habits, eunicids have been classified as organisms with broad omnivory (including macro- and microphagous feeding), as a result of the presence of jaws and maxillae that allow them to handle food larger than their mouths (Jumars *et al.*, 2015).

Their species have been utilized by humans in various ways. Specimens of *Eunice* and *Marphysa* are widely used as bait in

que les permiten manejar alimentos más grandes que sus bocas (Jumars *et al.*, 2015).

Sus especies han sido aprovechadas por los humanos de diversas maneras. Ejemplares de *Eunice* y *Marphysa* son ampliamente utilizados como carnada en la pesca, documentado en varios estudios (Zanol y Bettoso, 2006; Carrera-Parra *et al.*, 2008; Salazar-Vallejo *et al.*, 2011; Lavesque *et al.*, 2017). También se ha demostrado que estos organismos son una fuente nutritiva importante, ya que son ricos en proteínas y bajos en grasa (Pamungkas, 2015), además de ser una excelente fuente de yodo, un mineral esencial para el crecimiento y desarrollo del feto hasta la niñez, así como para las madres embarazadas y lactantes (Latumahina y Mailoa, 2016).

Se ha observado que los ejemplares grandes de *Marphysa* tienen un impacto positivo en la calidad del sedimento, ya que reducen los niveles de materia orgánica, azufre y hierro, y modifican el pH, sin comprometer su supervivencia. Por lo tanto, se recomienda su uso como biorremediadores de sedimentos en estanques de acuicultura enriquecidos orgánicamente (Mandario *et al.*, 2019).

La investigación sobre poliquetos de la familia Eunicidae en el Caribe colombiano es limitada, debido, en parte, a la escasez de estudios taxonómicos con claves recientes para la región, así como al uso incipiente de técnicas moleculares, sumado a esto la falta de expertos, centros especializados e información para la región. Por tal motivo, puede ser comprensible que aún, en el Caribe, no se hayan descrito alrededor de un tercio de las especies pertenecientes a esta familia (Salazar-Vallejo, 1996). A pesar de estos desafíos, Colombia posee una representación significativa de la fauna de poliquetos en el Caribe (Leon *et al.*, 2019). En este contexto, la presentación de una lista de verificación actualizada de poliquetos busca contribuir a una estimación más precisa del número de especies conocidas en el Caribe colombiano, contribuyendo a un mayor entendimiento en la diversidad, distribución de estas especies para su conservación y aprovechamiento para las comunidades locales.

METODOLOGÍA

La información se recopiló de publicaciones formales (artículos de revistas científicas, libros y trabajos de grado), incluyendo y tomando como referencia la lista más reciente de especies (Leon *et al.*, 2019) y publicaciones recientes para la región. Los

fishing, documented in several studies (Zanol and Bettoso, 2006; Carrera-Parra *et al.*, 2008; Salazar-Vallejo *et al.*, 2011; Lavesque *et al.*, 2017). It has also been shown that these organisms are an important nutritional source, as they are rich in proteins and low in fat (Pamungkas, 2015), in addition to being an excellent source of iodine, an essential mineral for the growth and development of the fetus up to childhood, as well as for pregnant and lactating mothers (Latumahina and Mailoa, 2016).

It has been observed that large specimens of *Marphysa* have a positive impact on sediment quality, as they reduce levels of organic matter, sulfur, and iron, and modify the pH, without compromising their survival. Therefore, their use is recommended as bioremediators of sediments in organically enriched aquaculture ponds (Mandario *et al.*, 2019).

Research on polychaetes of the family Eunicidae in the Colombian Caribbean is limited, due in part to the scarcity of taxonomic studies with recent keys for the region, as well as the incipient use of molecular techniques, additional to the lack of experts, specialized centers, and information for the region. For this reason, it is understandable that about a third of the species belonging to this family have not yet been described in the Caribbean (Salazar-Vallejo, 1996). Despite these challenges, Colombia has a significant representation of polychaetes fauna in the Caribbean (Leon *et al.*, 2019). In this context, the presentation of an updated checklist of polychaetes aims to contribute to a more accurate estimation of the number of known species in the Colombian Caribbean, contributing to a greater understanding of the diversity and distribution of these species for their conservation and utilization by local communities.

METHODOLOGY

The information was gathered from formal publications (scientific journal articles, books, and theses), including and taking as a reference the most recent list of species (Leon *et al.*, 2019), and recent publications for the region. The species records were tabulated in an Excel matrix, assigning to each species name its corresponding citation.

All species names and taxonomic authorities were verified with the World Register of Marine Species (WoRMS) database. Through this, possible synonyms and homonyms were verified and resolved, and the geographical distribution of each species

registros de especies fueron tabulados en una matriz de Excel, asignando a cada nombre de especie su cita correspondiente.

Todos los nombres de especies y autoridades taxonómicas fueron corroborados con la base de datos del Registro Mundial de Especies Marinas (WoRMS). A través de esta, se verificaron y resolvieron posibles sinonimias y homonimias, y se confirmó la distribución geográfica de cada especie. La lista final de taxones está organizada en orden alfabético, primero por epíteto genérico y luego por epíteto específico.

En aquellos casos en los que originalmente se trata a las especies como “cf.”, se respetó dicha denominación, ya que en el presente estudio no se revisó material adicional que pudiera clarificar los registros. La lista incluye los nombres válidos actuales, la referencia que habla de este taxón y una inicial “Q” (cuestionable) asociada a esta referencia, para las especies cuya presencia en la región es dudosa, con lo cual se demuestra la necesidad de revisar morfológicamente el material de cada especie, con el fin de evaluar su presencia en la región. En los casos donde aparecen sinonimias u homonimias, éstas se denotan entre paréntesis, señalando el nombre que es realmente aceptado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1. Resultados de los registros de especies con su cita correspondiente.

Eunicidae Berthold, 1827	
<i>Eunice</i> Cuvier, 1817	
<i>Eunice afra</i> Peters, 1854	Reyes y Campos, 1992; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice antennata</i> (Savigny in Lamarck, 1818) [Aceptado como <i>Leodice antennata</i> Savigny in Lamarck, 1818]	Dueñas, 1981; Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Quirós-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013; Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2018 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice antillensis</i> Ehlers, 1887 [Aceptado como <i>Leodice antillensis</i> (Ehlers, 1887)]	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Eunice aphroditois</i> (Pallas, 1788)	Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice atlantica</i> Kinberg, 1865	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice biannulata</i> Moore, 1904	Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice binominata</i> Quatrefages, 1866	Augener, 1933a; Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002. Baéz y Ardila, 2003.
<i>Eunice brevis</i> (Ehlers, 1887)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.

was confirmed. The final list of taxa is organized in alphabetical order, first by generic epithet and then by specific epithet.

In those cases where species are originally treated as “cf.”, this designation was respected, as no additional material was reviewed in the present study that could clarify the records. The list includes the current valid names, the reference that discusses this taxon, and a “Q” (questionable) initial associated with this reference for species whose presence in the region is doubtful, thereby demonstrating the need to morphologically review the material of each species in order to assess their presence in the region. In cases where synonyms or homonyms appear, these are denoted in parentheses, indicating the name that is actually accepted.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1. Results of species records with their corresponding citation.

<i>Eunice cariboea</i> Grube, 1856 [Aceptado como <i>Nicidion cariboea</i> (Grube, 1856)]	Augener, 1933a; Rodríguez-Gómez, 1979; Rodríguez-Gómez, 1988; Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Quirós-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice cf miurai</i> Carrera-Parra y Salazar-Vallejo, 1998 [Aceptado como <i>Leodice miurai</i> (Carrera-Parra y Salazar-Vallejo, 1998)]	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Eunice collini</i> Augener, 1906	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice colombia</i> Ardila, Fauchald y Lattig, 2005	Baéz y Ardila, 2003; Ardila <i>et al.</i> , 2005; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice denticulata</i> Webster, 1884	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice filamentosa</i> Grube y Örsted in Grube, 1856	Rodríguez-Gómez, 1979; Dueñas, 1981; Reyes y Campos, 1988; Rodríguez-Gómez, H. 1988; Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Quirós-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice fucata</i> Ehlers, 1887	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice floridana</i> (Pourtalès, 1867)	Rodríguez-Gómez, 1979; Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice gagzoi</i> Augener, 1922	Augener, 1922; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice goodei</i> Fauchald, 1992	Molina-Acevedo, 2012 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice guanica</i> (Treadwell, 1921)	Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice hartmanae</i> Carrera-Parra & Salazar-Vallejo, 1998	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice hawaiiensis</i> Treadwell, 1906	Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice imogena</i> (Monro, 1924)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024
<i>Eunice kinbergi</i> Ehlers, 1868	Dueñas, P.R. 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice lanai</i> Carrera-Parra & Salazar-Vallejo, 1998	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice multicylindri</i> Shisko, 1981	Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice mutilata</i> Webster, 1884 [Aceptado como <i>Nicidion mutilata</i> (Webster, 1884)]	Augener, 1933a; Rodríguez-Gómez, 1988; Reyes y Campos, 1992; Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Molina-Acevedo, 2012 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice panamena</i> (Chamberlin, 1919)	Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice pulvinopalpata</i> Fauchald, 1982	Dueñas <i>et al.</i> , 2024 Q.
<i>Eunice rubra</i> Grube, 1856 [Aceptado como <i>Leodice rubra</i> (Grube, 1856)]	Rodríguez-Gómez, 1988; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024
<i>Eunice rubrivittata</i> (Treadwell, 1921)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice schemacephala</i> Schmarda, 1861	Rodríguez-Gómez, 1979; Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice semisegregata</i> Fauchald, 1969	Coneo-Gómez <i>et al.</i> , 2022; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice stigmatura</i> (Verrill, 1900)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice tenuis</i> (Treadwell, 1921)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice thomasiana</i> Augener, 1922 [Aceptado como <i>Leodice thomasiana</i> (Augener, 1922)]	Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice tridentata</i> Ehlers, 1905	Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.

<i>Eunice unifrons</i> (Verrill, 1900) [Aceptado como <i>Leodice unifrons</i> Verrill, 1900]	Molina- Acevedo, 2012 Q; Coneo-Gómez <i>et al.</i> , 2022.
<i>Eunice vittata</i> (Delle Chiaje, 1828)	Augener, 1933b; Rodríguez-Gómez, 1988; Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Lavesque <i>et al.</i> , 2017; Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2018 Q.
<i>Eunice vittatopsis</i> Fauchald, 1970: 17	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Eunice websteri</i> Fauchald, 1969	Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Molina-Acevedo, 2012 Q; Quirós-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Eunice</i> sp. 1	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Eunice</i> sp. 2	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Euniphysa</i> Wenserber-Lund, 1949	
<i>Euniphysa</i> sp. 1	Guzmán-Alvis <i>et al.</i> , 2001; Guzmán-Alvis y Carrasco, 2005; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Lysidice</i> Lamarck, 1818	
<i>Lysidice caribensis</i> Carrera-Parra, Fauchald y Gambi, 2011	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Lysidice collaris</i> Grube, 1868	Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Lysidice ninetta</i> Audouin y H Milne Edwards, 1833	Augener, 1933b; Rodríguez-Gómez, 1979; Reyes y Campos, 1992; Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2015 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Lysidice phyllisae</i> Carrera-Parra, Fauchald y Gambi, 2011	Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2018 Q.
<i>Marphysa</i> Quatrefages, 1866	
<i>Marphysa aransensis</i> Treadwell, 1939	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Marphysa cf aenea</i> (Blanchard in Gay, 1849)	Victoria y Pérez, 1979; Baéz y Ardila, 2003; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Marphysa longula</i> (Ehlers, 1887) [(Aceptado como <i>Nicidion longula</i> (Ehlers, 1887)]	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Molina-Acevedo, 2012 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Marphysa orensanzi</i> Carrera-Parra y Salazar-Vallejo, 1998	Molina-Acevedo, 2012 Q.
<i>Marphysa regalis</i> Verrill, 1900	Rodríguez-Gómez, 1988; Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Quirós-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Marphysa sanguinea</i> (Montagu, 1813)	Augener, 1933b; Rodríguez-Gómez, 1979; Rodríguez-Gómez, 1988; Reyes y Campos, 1992; Dueñas, 1999; Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2018 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Marphysa</i> sp. 1	Baéz y Ardila, 2003.
<i>Marphysa</i> sp. 1	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002.
<i>Marphysa</i> sp. 2	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002.
<i>Nematoneis</i> Schmarda, 1861 (Aceptado como <i>Lysidice</i> Lamarck, 1818)	
<i>Nematoneis hebes</i> Verrill, 1900 [Aceptado como <i>Lysidice hebes</i> (Verrill, 1900)]	Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Díaz-Díaz, <i>et al.</i> , 2015 Q; Díaz-Díaz, <i>et al.</i> , 2018 Q.
<i>Nematoneis unicornis</i> (Grube, 1840) [Aceptado como <i>Lysidice unicornis</i> (Grube, 1840)]	Dueñas, 1999; Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002; Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2015 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019; Dueñas <i>et al.</i> , 2024.

<i>Nematonereis</i> sp. 1	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002.
<i>Nicidion</i> Kinberg, 1865	
<i>Nicidion angeli</i> (Carrera-Parra & Salazar-Vallejo, 1998)	Dueñas <i>et al.</i> , 2024.
<i>Palola</i> Gray in Stair, 1847	
<i>Palola sicilensis</i> (Grube, 1840)	Baéz y Ardila, 2003; Díaz-Díaz y Liñero-Arana, 2003 Q; Molina-Acevedo, 2012 Q; Leon <i>et al.</i> , 2019.
<i>Palola</i> sp. 1	Londoño-Mesa <i>et al.</i> , 2002.

Pese a que los poliquetos son invertebrados muy abundantes, en Colombia, son uno de los grupos menos estudiados, resultado a que la información disponible se basa principalmente en registros que carecen de un examen taxonómico exhaustivo (Londoño-Mesa, 2011). La investigación limitada sobre eunícidos en el Caribe colombiano revela un déficit notable en el conocimiento de la diversidad de estos invertebrados marinos, lo cual se evidencia en la escasez de estudios y registros para la mayoría de las especies.

Leon *et al.* (2019) registraron un total de siete géneros (*Eunice*, *Euniphysa*, *Leodice*, *Lysidice*, *Marphysa*, *Nicidion*, *Palola*), cifra que para la actualidad no ha aumentado, a pesar de los últimos estudios (Coneo-Gómez *et al.*, 2022; Dueñas *et al.*, 2024) para la familia Eunicidae en el Caribe colombiano. Sin embargo, se ha registrado un aumento en el número de especies, pasando de 35 en el último listado a 54, junto con ocho registros a nivel de género (sp.). No obstante, este aumento se genera a partir de especies como: *Eunice* sp. 1, *Eunice* sp. 2, *Leodice antillensis*, *Leodice miurai*, *Lysidice caribensis* y *Marphysa orensanzi*, las cuales se consideran cuestionables para la región, ya que fueron identificadas en un trabajo de grado que no cuenta con una publicación formal. El material identificado como *Eunice pulvinopalpata* Fauchald, 1982, por Dueñas *et al.* (2024) es cuestionable, debido a que esta especie se describió para el Pacífico mexicano, a 2633 m de profundidad; por lo tanto, la identificación de este material para Isla Cayo Serrana, Caribe colombiano, se denota como Q (cuestionable) en el presente listado. Este material deberá compararse con el material tipo para confirmar su identidad y distribución.

También es relevante considerar los registros a nivel de género, como *Marphysa* sp. 1, *Marphysa* sp. 2, *Nematonereis* sp. 1 y *Palola* sp. 1, los cuales no se incluyeron en listados previos.

Although polychaetes are very abundant invertebrates, in Colombia, they are one of the least studied groups, resulting from the fact that the available information is mainly based on records that lack a thorough taxonomic examination (Londoño-Mesa, 2011). Limited research on eunicids in the Colombian Caribbean reveals a significant deficit in the knowledge of the diversity of these marine invertebrates, which is evident in the scarcity of studies and records for most of the species.

Leon *et al.* (2019) recorded a total of seven genera (*Eunice*, *Euniphysa*, *Leodice*, *Lysidice*, *Marphysa*, *Nicidion*, *Palola*), a number that has not increased to date, despite recent studies (Coneo-Gómez *et al.*, 2022; Dueñas *et al.*, 2024) on the family Eunicidae in the Colombian Caribbean. However, there has been an increase in the number of species, rising from 35 in the last list to 54, along with eight records at the genus level (sp.). However, this increase is generated from species such as: *Eunice* sp. 1, *Eunice* sp. 2, *Leodice antillensis*, *Leodice miurai*, *Lysidice caribensis*, and *Marphysa orensanzi*, which are considered questionable for the region, as they were identified in a thesis that does not have a formal publication. The material identified as *Eunice pulvinopalpata* Fauchald, 1982, by Dueñas *et al.* (2024) is questionable, because this species was described for the Mexican Pacific, at a depth of 2633 m; therefore, the identification of this material for Cayo Serrana Island, Colombian Caribbean, is denoted as Q (questionable) in the present list. This material should be compared with the type material to confirm its identity and distribution.

It is also relevant to consider records at the genus level, such as *Marphysa* sp. 1, *Marphysa* sp. 2, *Nematonereis* sp. 1 and *Palola* sp. 1, which were not included in previous lists. Including these records in future studies will allow researchers to have more complete information and will facilitate access to reference

Incluir estos registros en estudios futuros permitirá a los investigadores disponer de información más completa y facilitará el acceso a material de referencia que pueda ser semejante a los organismos en estudio, ayudando a esclarecer la diversidad de especies en la región.

De igual forma, *Lysidice hebes* y *Lysidice phyllisae* han sido registradas en regiones cercanas, como el Golfo de Venezuela, pero no en Colombia, lo que subraya la necesidad de aumentar el esfuerzo de muestreo y estudios para confirmar su presencia en el Caribe colombiano. Por último, el género *Euniphysa* cuenta con una única especie cuyo respaldo taxonómico es insuficiente para asignarle un epíteto específico, lo que refuerza la necesidad de realizar estudios exhaustivos en el Caribe colombiano sobre esta familia con el fin de mejorar la precisión de los registros taxonómicos.

CONCLUSIÓN

Si se tiene en cuenta el aumento en la cantidad de especies documentadas en el Caribe colombiano entre 2019 y 2024, con los registros cuestionables (Q), se reflejaría una mayor diversidad biológica en la región de lo que se pensaba anteriormente. Sin embargo, sigue siendo un incremento pobre en los estudios de esta familia, lo que subraya la importancia de estudios continuos y detallados para una comprensión completa de la biodiversidad local. La presentación de este documento permite contribuir a una estimación más precisa del número de especies de la familia Eunicidae conocidas en el mar Caribe colombiano. Asimismo, se enfatiza la importancia de seguir las recomendaciones de [Leon et al. \(2019\)](#) para obtener resultados más completos y precisos sobre la diversidad de eunícidos en esta región. Estas recomendaciones incluyen: 1) Aumentar el esfuerzo de muestreo en ecorregiones con escasos o nulos registros. 2) Realizar un trabajo taxonómico más riguroso, que incluya información detallada sobre el hábitat, el rango batimétrico y las observaciones ecológicas, lo cual es esencial para mejorar el conocimiento sobre la diversidad de los eunícidos en el Caribe colombiano y asegurar la precisión en la identificación y documentación de las especies.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del grupo de investigación Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina

material that may be similar to the organisms under study, helping to clarify the diversity of species in the region.

Similarly, *Lysidice hebes* and *Lysidice phyllisae* have been recorded in nearby regions, such as the Gulf of Venezuela, but not in Colombia, highlighting the need to increase sampling efforts and studies to confirm their presence in the Colombian Caribbean. Finally, the genus *Euniphysa* has a single species whose taxonomic support is insufficient to assign it a specific epithet, which underscores the need for comprehensive studies in the Colombian Caribbean on this family to improve the accuracy of taxonomic records.

CONCLUSION

If the increase in the number of documented species in the Colombian Caribbean between 2019 and 2024 is taken into account, including the questionable records (Q), it would reflect a greater biological diversity in the region than previously thought. However, it remains a poor increase in the studies of this family, which underscores the importance of continuous and detailed studies for a complete understanding of local biodiversity. The presentation of this document allows for a more accurate estimation of the number of species of the family Eunicidae known in the Colombian Caribbean Sea. Likewise, the importance of following the recommendations of [Leon et al. \(2019\)](#) is emphasized in order to obtain more complete and accurate results on the diversity of eunícids in this region. These recommendations include: 1) Increasing the sampling effort in ecoregions with few or no records. 2) Conduct a more rigorous taxonomic work, which includes detailed information about the habitat, bathymetric range, and ecological observations, which is essential to improve knowledge about the diversity of eunícids in the Colombian Caribbean and ensure accuracy in the identification and documentation of the species.

ACKNOWLEDGMENTS

The support of the research group Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina (LimnoBasE y Biotamar COL 0013263), from the Institute of Biology of the University of Antioquia, is appreciated. To Laura Cristina Moreno Jiménez for her support. To the anonymous reviewers for their suggestions.

(LimnoBasE y Biotamar COL 0013263), del Instituto de Biología de la Universidad de Antioquia. A Laura Cristina Moreno Jiménez por su acompañamiento. A los evaluadores anónimos por sus sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Amaral, A., Cecília, E. y Nonato, E.F. (1996). *Annelida Polychaeta: Características, glossário e chaves para famílias e gêneros da costa brasileira*. Campinas: Ed. da UNICAMP, p. 121.
- Ardila, N.E., Fauchald, K. and Lattig, P. (2005). *Eunice colombia* (Eunicidae: Polychaeta), a new species from the southern Caribbean. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 118(2): pp. 259-263. [http://dx.doi.org/10.2988/0006-324X\(2005\)118\[259:ECEPAN\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.2988/0006-324X(2005)118[259:ECEPAN]2.0.CO;2)
- Augener, H. (1922). *Ueber litorale Polychaeten von Westindien. Sitzungsber.* Berlin: Ges. Naturforsch., Freunde 1922 (3-5): pp. 38-63.
- Augener, H. (1933a). Polychaeten aus den zoologischen Museen von Leiden und Amsterdam. Pt. II. *Zoologische Mededelingen*, 16(12), pp. 107-128.
- Augener, H. (1933b). Polychaeten aus den zoologischen Museen von Leiden und Amsterdam. Pt. III. *Zool. Zoologische Mededelingen*, 16: pp. 177-260.
- Baéz, D. y Ardila, N. (2003). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) del Mar Caribe colombiano. *Biota Colombiana*, 4(1): pp. 89-109.
- Carrera-Parra, L.F. y Molina-Acevedo, I.C. (2021). Eunicidae Berthold, 1827 (pp. 241-266). En: *Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México y América Tropical*. Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 422.
- Carrera-Parra, L.F. and Salazar-Vallejo, S.I. (1998). A new genus and 12 new species of Eunicidae (Polychaeta) from the Caribbean Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 78(1): pp. 145-182. <http://dx.doi.org/10.1017/S0025315400040005>
- Carrera-Parra, L.F., Rizzo, A.E. and Salazar-Vallejo, S.I. (2008). Redescription of *Eunice sebastiani* and recognition of *E. riojai* (Polychaeta: Eunicidae). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 88(3): pp. 503-507. <https://doi.org/10.1017/s002531540800091x>
- Carrera-Parra, L.F., Fauchald, K. and Gambi, M.C. (2011). Revision of the taxonomic status of *Lysidice* (Polychaeta, Eunicidae) in the western Caribbean Sea with observations on species reproductive features and habitat preference. *Italian Journal of Zoology*, 78(1): pp. 27-40. <http://dx.doi.org/10.1080/11250003.2011.593850>
- Coneo-Gómez, S., Sierra-Escrigas, S., Dueñas-Ramírez, P. R. y García-Urueña, R. (2022). Nuevos registros de anélidos del banco de las Ánimas, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 51(1), pp. 9-36. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2022.51.1.1083>
- Díaz-Díaz, O.F. and Liñero-Arana, I. (2003). Epifaunal polychaetes on *Pinctada imbricata* Röding, 1798 (Bivalvia: Pteriidae) from the Gulf of Cariaco, Venezuela: *Interciencia*, 28: pp. 298-301.
- Díaz-Díaz, O.F., Bone, D., Rodriguez, C. and López-Ordaz, A. (2015). Polychaetes associated to calcareous sediments, Venezuela: Eunicidae. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 11: pp. 18-25.
- Díaz-Díaz, O.F., Bone, D. and López-Ordaz, A. (2018). Eunicida (Annelida: Polychaeta) from soft-bottoms from the Gulf of Venezuela. *Saber*, 30: pp. 138-150.
- Dueñas, P.R. (1981). Inventario preliminar de los poliquetos (Annelida) de aguas someras de la bahía de Cartagena y áreas adyacentes. *Boletín Museo del Mar*, 10: pp. 82-138.
- Dueñas, P.R. (1999). Algunos poliquetos (Annelida) del Caribe colombiano. *Revista Milenio Facultad de Ciencias Básicas Universidad de Córdoba*, 1: pp. 9-18.
- Dueñas, P.R., Dueñas-Lagos, A.C. y Campos, N.H. (2024). Poliquetos (Annelida) de las islas Cayos de Alburquerque y Cayos de Serranilla, Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 43(1): pp. 5-18. <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.628>
- Guzmán-Alvis, A.I. and Carrasco, F. (2005). Influence of a tropical lagoon discharge and depth on the structure of adjacent shelf macroinfauna (Southern Caribbean). *Cahiers de Biologie Marine*, 46: pp. 81-93.
- Guzmán-Alvis, A.I., Solano, O.D., Córdoba-Tejada, M. y López-Rodríguez, A. (2001). Comunidad macroinfaunal de fondos blandos someros tropicales (Caribe colombiano). *Boletín Investigaciones Marinas y Costeras*, 30: pp. 39-66. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2001.30.0.298>
- Hartmann-Schröder, G. and Zibrowius, H. (1998). Polychaeta associated with Antipatharia (Cnidaria: Anthozoa): description of Polynoidae and Eunicidae. *Mitteilungen aus dem Hamburgischen Zoologischen Museum und Institut*, 95: pp. 29-44.
- Jumars, P.A., Dorgan, K.M. and Lindsay, S.M. (2015). Diet of worms emended: An update of polychaete feeding guilds. *Annual Review of Marine Science*, 7(1): pp. 497-520. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-020007>
- Latumahina, A. and Mailoa, M.N. (2016). Iodine content and nutrition worms Polychaeta. *International Journal of ChemTech Research*, 9(1): pp. 147-150.
- Lavesque, N., Daffe, G. Bonifácio, P. and Hutchings, P. (2017). A new species of the *Marphysa sanguinea* complex from French waters (Bay of Biscay, NE Atlantic) (Annelida, Eunicidae). *ZooKeys*, 716: pp. 1-17. <https://doi.org/10.3897/zookeys.716.14070>
- León, M.V., Lagos, A.M., Quiroga-Sigmer, Y. and Dueñas-Ramírez, P.R. (2019). Polychaetes from the Caribbean coast of Colombia: An updated checklist and some taxonomic annotations. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(169): pp. 646-652. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.802>

- Londoño-Mesa, M.H. (2011). Terebélidos (Terebellidae: Polychaeta: Annelida) del Caribe colombiano. *Biota Colombiana*, 12(1): pp. 1-18.
- Londoño-Mesa, M., Polanía, J. and Vélez, I. (2002). Polychaetes of the mangrove-fouling community at the Colombian Archipelago of San Andrés and Old Providence, Western Caribbean. *Wetlands Ecology and Management*, 10: pp. 227-232. <https://doi.org/10.1023/A%3A1020127814042>
- Mandario, M.A.E., Alava, V.R. and Añasco, N.C. (2019). Evaluation of the bioremediation potential of mud polychaete *Marphysa* sp. in aquaculture pond sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(29): pp. 29810-29821. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06092-z>
- Molina-Acevedo, I.C. (2012). *Poliquetos (Polychaeta: Annelida) de Isla Fuerte, Caribe colombiano*. Tesis Biología. Universidad de Medellín. p. 187.
- Molina-Acevedo, I.C. (2018). Morphological revision of the Subgroup 1 Fauchald, 1970 of *Marphysa* de Quatrefages, 1865 (Eunicidae: Polychaeta). *Zootaxa*. 4480 (1): pp. 1-125. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4480.1.1>
- Molina-Acevedo, I.C. and Carrera-Parra, L.F. (2017). Revision of *Marphysa* de Quatrefages, 1865 and some species of *Nicidion* Kinberg, 1865 with the erection of a new genus (Polychaeta: Eunicidae) from the Grand Caribbean. *Zootaxa*, 4241(1): pp. 1-62. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4241.1.1>
- Pamungkas, J. (2015). Species richness and macronutrient content of wawo worms (Polychaeta, Annelida) from Ambonese waters, Maluku, Indonesia. *Biodiversity Data Journal*, 3 (3): e4251. <https://doi.org/10.3897/bdj.3.e4251>
- Quirós-Rodríguez, J., Dueñas, P.R. y Campos, N.H. (2013). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) asociados a algas rojas intermareales de Córdoba, Caribe colombiano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48(1): pp. 87-98.
- Reyes, R. y Campos, N.H. (1992). Moluscos, anélidos y crustáceos asociados a las raíces de *Rhizophora mangle* Linnaeus, en la región de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia*, 17(1): pp. 133-134.
- Rodríguez-Gómez, H. (1979). Poliquetos de aguas someras colectados en las Islas del Rosario. *Anales del instituto de investigaciones de punta de Betín*, 11: pp. 27-29.
- Rodríguez-Gómez, H. (1988). Contribución al conocimiento de los anélidos (Annelida: Polychaeta) de aguas someras en la bahía de Nenguange, Parque Nacional Natural Tayrona, Colombia. *Trianea Acta Científica y Tecnológica Inderena*, 2: pp. 403-443. Rouse, G.W. and Pleijel, F. (2001). Polychaetes. Oxford: Oxford University. *Geological Magazine*, 140(5): pp. 617-618. <https://doi.org/10.1017/S0016756803278341>
- Ruiz-Cancino, G., Carrera-Parra, L.F. y Bastida-Zavala, R. (2010). Eunícidos (Polychaeta: Eunicidae) del Pacífico sur de México. *Ciencias Marinas*, 40: pp. 27-60.
- Salazar-Vallejo, S.I. (2009). Lista de especies y bibliografía de poliquetos (Polychaeta) del Gran Caribe. *Anales Del Instituto De Biología Serie Zoología*, 67(001).
- Salazar-Vallejo, S.I., Carrera-Parra, L.F. and De León-González, J.A. (2011). Giant eunicid polychaetes (Annelida) in shallow tropical and temperate seas. *Revista Biología Tropical*, 59(4): pp. 1463-1474. <https://doi.org/10.15517/rbt.v59i4.3411>
- Verdonschot, P.F.M. (2015). Introduction to Annelida and the Class Polychaeta. 507-528. En: Thorp, J., Rogers, D.C. eds., *Ecology and General Biology: Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates*, Academic Press, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo: Academic Press: pp. 1118. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385026-3.00020-6>
- Victoria, C.H. y Pérez, M.E. (1979). Los taxa Annelida-Mollusca-Crustacea en las raíces sumergidas del mangle rojo en dos áreas costeras del Caribe colombiano. *Informe Museo del Mar*, 2: pp. 1-27.
- Zanol, J. and Bettoso, N. (2006). Identity of *Eunice roussaei* (Eunicidae: Polychaeta: Annelida) from the Adriatic and Mediterranean Seas. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 86(5): pp. 1017-1024. <https://doi.org/10.1017/s0025315406013993>





ARTÍCULO / ARTICLE

Investigación de la subsidencia antropogénica en Fremantle, Australia Occidental, mediante GPS, altimetría por satélite y datos de mareógrafos

Investigating anthropogenic subsidence in Fremantle, Western Australia, using GPS, satellite altimetry, and tide gauge data

Alberto Boretti

0000-0002-3374-0238
a.a.boretti@gmail.com

Recibido / Received: 19/02/2025

Aceptado / Accepted: 25/05/2025

Citación / Citation: Boretti, A. 2025. Investigación de la subsidencia antropogénica en Fremantle mediante GPS, altimetría por satélite y datos de mareógrafos. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 100-133

RESUMEN

La subsidencia antropogénica contribuye al aumento relativo del nivel del mar (RSLR) en ciudades costeras, causada por extracción de agua subterránea, minería y carga de infraestructuras. Este estudio analiza Fremantle, integrando datos de mareógrafos, GPS y altimetría satelital para evaluar la velocidad y aceleración del RSLR con ajustes lineales y parabólicos, capturando efectos eustáticos climáticos y subsidencia local. Los datos de GPS muestran una subsidencia de 1,56 mm/año en Fremantle; las tendencias históricas se derivan de modelos de Ajuste Isostático Glacial (GIA). Corregida la subsidencia, la velocidad del aumento absoluto del nivel del mar (ASLR) es mínima (+0,16 mm/año) con aceleración negativa (-0,0103 mm/año²). Un análisis de 153 registros globales de mareógrafos muestra correlación entre altas tasas de RSLR y subsidencia local, con velocidades de ASLR entre 0-2 mm/año; las aceleraciones son menos fiables. La subsidencia antropogénica, creciente desde finales del siglo XIX, es clave en el RSLR registrado. Sin corregir el movimiento del terreno, se sobreestima el aumento eustático climático. Integrar datos de GPS y GIA es esencial para evaluar tendencias del nivel del mar y diseñar estrategias de gestión costera.

Palabras clave: Teledetección; Sistema de Posicionamiento Global (GPS); Mareógrafos; Nivel del mar relativo; Nivel del mar absoluto.

ABSTRACT

Anthropogenic subsidence contributes to relative sea level rise (RSLR) in coastal cities, driven by groundwater extraction, mining, and infrastructure loading. This study analyzes Fremantle, integrating tide gauge, GPS, and satellite altimetry data to assess RSLR velocity and acceleration using linear and parabolic fits, capturing climate-driven eustatic effects and local subsidence. GPS data show a subsidence rate of 1.56 mm/yr in Fremantle; historical trends are derived from Glacial Isostatic Adjustment (GIA) models. After correcting for subsidence, Fremantle's absolute sea level rise (ASLR) velocity is minimal (+0.16 mm/yr) with a negative acceleration (-0.0103 mm/yr²). Analysis of 153 global tide gauge records reveals a correlation between high RSLR rates and significant local subsidence, with ASLR velocities between 0-2 mm/yr; accelerations are less reliable. Anthropogenic subsidence, increasing since the late 1800s, is a key driver of recorded RSLR. Without correcting for land motion, climate-driven eustatic rise is overestimated. Integrating GPS and GIA data is essential for accurately assessing sea level trends and designing coastal management strategies.

Key words: remote sensing, global positioning system, tide gauges, relative sea level, absolute sea level.



INTRODUCCIÓN

Comprender las tendencias a largo plazo y la aceleración del nivel del mar es crucial para monitorear el cambio climático, evaluar la vulnerabilidad costera e informar las estrategias de adaptación (Emery y Aubrey, 1989; Schlesinger y Ramankutty, 1994; Douglas, 1995, 1997; Chambers *et al.*, 2012). Los mareógrafos proporcionan registros observacionales esenciales y a largo plazo, pero miden el nivel del mar en relación con la tierra sobre la que se asientan. Por lo tanto, estos registros combinan intrínsecamente cambios en el volumen del agua oceánica (impulsados por la expansión térmica y el derretimiento del hielo) con el movimiento vertical de la tierra (VLM), incluyendo elevación o hundimiento (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011; Emery y Aubrey, 2012). Separar estos componentes es fundamental para determinar con precisión el cambio absoluto (geocéntrico) del nivel del mar.

La subsidencia del terreno, ya sea por procesos geológicos naturales como el ajuste isostático glacial (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999) o la actividad tectónica, o cada vez más por actividades antropogénicas, impacta significativamente en las mediciones del nivel relativo del mar. Las actividades humanas, incluyendo la extracción extensiva de aguas subterráneas, la producción de petróleo y gas, la minería, y la carga inducida por la urbanización, son factores bien documentados que aceleran la subsidencia en muchas regiones costeras a nivel mundial, a menudo donde se ubican los mareógrafos (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2017, 2018; Wu *et al.*, 2022). Sin embargo, la posible aceleración de la subsidencia del terreno en sí, que puede ser comparable en magnitud a la aceleración del aumento absoluto del nivel del mar (Antonov *et al.*, 2005; Marcos y Amores, 2014), a menudo ha sido pasada por alto en los análisis tradicionales de mareógrafos.

El advenimiento y la proliferación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y otros Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) han revolucionado la capacidad de monitorear el VLM con alta precisión y resolución temporal (Blewitt *et al.*, 2010; Blewitt y Hammond, 2018). Las mediciones continuas de GPS proporcionan datos cruciales para cuantificar las tasas contemporáneas de subsidencia o elevación en o cerca de las ubicaciones de los mareógrafos (Zervas *et al.*, 2013; Wöppelmann y Marcos, 2016). Corregir los registros de los mareógrafos

INTRODUCTION

Understanding long-term trends and acceleration in sea level is crucial for monitoring climate change, assessing coastal vulnerability, and informing adaptation strategies (Emery and Aubrey, 1989; Schlesinger and Ramankutty, 1994; Douglas, 1995, 1997; Chambers *et al.*, 2012). Tide gauges provide essential, long-term observational records, but they measure sea level relative to the land upon which they sit. Consequently, these records inherently combine changes in ocean water volume (driven by thermal expansion and ice melt) with vertical land motion (VLM), including uplift or subsidence (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011; Emery and Aubrey, 2012). Disentangling these components is critical for accurately determining absolute (geocentric) sea level change.

Land subsidence, whether from natural geological processes like glacial isostatic adjustment (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999) or tectonic activity, or increasingly from anthropogenic activities, significantly impacts relative sea level measurements. Human activities, including extensive groundwater extraction, oil and gas production, mining, and urbanization-induced loading, are well-documented drivers of accelerating subsidence in many coastal regions globally, often where tide gauges are located (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2017, 2018; Wu *et al.*, 2022). However, the potential acceleration of land subsidence itself, which can be comparable in magnitude to the acceleration of absolute sea level rise (Antonov *et al.*, 2005; Marcos and Amores, 2014), has often been overlooked in traditional tide gauge analyses.

The advent and proliferation of Global Positioning System (GPS) and other Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have revolutionized the ability to monitor VLM with high precision and temporal resolution (Blewitt *et al.*, 2010; Blewitt and Hammond, 2018). Continuous GPS measurements provide crucial data to quantify contemporary rates of subsidence or uplift at or near tide gauge locations (Zervas *et al.*, 2013; Wöppelmann and Marcos, 2016). Correcting tide gauge records using these precise VLM estimates allows for a more accurate determination of absolute sea level trends, reducing uncertainties in projections and improving our understanding of climate-driven sea level rise impacts (Dangendorf *et al.*, 2017). Integrating GPS with other techniques like InSAR and LiDAR further enhances

utilizando estas estimaciones precisas de VLM permite una determinación más precisa de las tendencias absolutas del nivel del mar, reduciendo las incertidumbres en las proyecciones y mejorando nuestra comprensión de los impactos del aumento del nivel del mar impulsado por el clima (Dangendorf *et al.*, 2017). La integración del GPS con otras técnicas como InSAR y LiDAR mejora aún más la cobertura espacial y la comprensión de patrones complejos de VLM (Tregoning y Watson, 2009; Bock *et al.*, 2011; Higgins, 2016; Harvey *et al.*, 2021).

Mientras que las técnicas geodésicas modernas ofrecen soluciones para el VLM contemporáneo, el análisis de las tendencias del nivel del mar a largo plazo enfrenta desafíos adicionales. La variabilidad climática natural, como las oscilaciones multidecenales, puede influir en las tasas observadas durante períodos más cortos. Además, los registros históricos de mareógrafos están sujetos a inconsistencias derivadas de cambios en la tecnología de los sensores (desde antiguos medidores mecánicos o de presión hasta modernos sistemas acústicos o de microondas) y reubicaciones de instrumentos, que pueden introducir sesgos y discontinuidades si no se documentan y corrigen cuidadosamente (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es evaluar meticulosamente las tendencias a largo plazo del nivel relativo del mar registradas por el mareógrafo en Fremantle, Australia Occidental. Al integrar datos contemporáneos de movimiento vertical de la tierra derivados de estaciones GPS cercanas y considerar estimaciones históricas, este trabajo busca aislar el componente de subsidencia del terreno y determinar las tendencias y aceleraciones correspondientes en el nivel absoluto (geocéntrico) del mar en esta ubicación.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es Perth, que posee el registro de mareógrafo más largo del océano Índico. Perth, la ciudad capital de Australia Occidental, fue establecida por Gran Bretaña como la Colonia del Río Swan en 1829. En 1850, la población de toda la colonia de Australia Occidental era de solo 5886 habitantes. En 1891, la población de Perth era de 8447. La población actual del área metropolitana de Perth es de 2143000.

spatial coverage and understanding of complex VLM patterns (Tregoning and Watson, 2009; Bock *et al.*, 2011; Higgins, 2016; Harvey *et al.*, 2021).

While modern geodetic techniques offer solutions for contemporary VLM, analyzing long-term sea level trends faces additional challenges. Natural climate variability, such as multi-decadal oscillations, can influence observed rates over shorter periods. Furthermore, historical tide gauge records are subject to inconsistencies arising from changes in sensor technology (from older mechanical or pressure gauges to modern acoustic or microwave systems) and instrument relocations, which can introduce biases and discontinuities if not carefully documented and corrected (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011).

Therefore, the primary aim of this study is to meticulously assess the long-term relative sea level trends recorded by the tide gauge in Fremantle, Western Australia. By integrating contemporary vertical land motion data derived from nearby GPS stations and considering historical estimates, this work seeks to isolate the component of land subsidence and determine the corresponding trends and accelerations in absolute (geocentric) sea level at this location.

STUDY AREA

The area of study is Perth, which hold the longest tide gauge record of the Indian Ocean. Perth, the capital city of Western Australia, was established by Britain as the Swan River Colony in 1829. In 1850, the population of the whole colony of Western Australia was only 5,886. In 1891, the population of Perth was 8,447. The current metro area population of Perth is 2,143,000.

To generalize the result for Perth, the case of Sydney will also be considered. Sydney, the capital city of New South Wales, started to develop earlier. In 1770, Lieutenant James Cook landed at Kurnell and in 1786 the British government decided to establish a convict settlement in Botany Bay. In 1851 the population of Sydney was only 39,000. In 1880, the population of Sydney was 224,900. The current metro area population of Sydney is 5,185,000.

While Australia is geologically stable, the relevance of mining and water withdrawal-induced subsidence is very well known. Water

Para generalizar el resultado para Perth, también se considerará el caso de Sídney. Sídney, la ciudad capital de Nueva Gales del Sur, comenzó a desarrollarse antes. En 1770, el teniente James Cook desembarcó en Kurnell y en 1786 el gobierno británico decidió establecer una colonia penitenciaria en Botany Bay. En 1851 la población de Sídney era de solo 39000. En 1880, la población de Sídney era de 224900. La población actual del área metropolitana de Sídney es de 5185000.

Aunque Australia es geológicamente estable, la subsidencia inducida por la minería y la extracción de agua es bien conocida. La subsidencia inducida por la extracción de agua está bien documentada en la cuenca de Perth, donde se encuentra el mareógrafo de Fremantle (Featherstone *et al.*, 2012; Parker *et al.*, 2017) y la subsidencia en el área de Sídney también está bien documentada (Garthwaite y Fuhrmann, 2020). La información sobre subsidencia para los últimos años está disponible en el Laboratorio Geodésico de Nevada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco conceptual y antecedentes

El enfoque matemático utilizado en este estudio modela la velocidad de subsidencia de los instrumentos de mareógrafo asumiendo un perfil lineal durante la duración del registro del mareógrafo. Este modelo postula una velocidad vertical inicial al comienzo del registro (x_s), a menudo establecida en cero o basada en modelos de Ajuste Isostático Glacial (GIA) (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999). Esta velocidad inicial transita linealmente a la tasa de subsidencia contemporánea determinada a partir de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que representa el movimiento vertical del terreno (VLM) en años recientes (Bell *et al.*, 2002; Burbey *et al.*, 2006; Abidin *et al.*, 2008; Baldi *et al.*, 2009; Blewitt *et al.*, 2009; Bock *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2014; Wang y Soler, 2015; Karegar *et al.*, 2016; Blewitt y Hammond, 2018; Hammond *et al.*, 2018; Rateb y Abotalib, 2020). Aspectos de esta metodología han sido previamente descritos y aplicados a registros de mareógrafos a largo plazo (Boretti, 2024a, 2024b).

El aumento relativo del nivel del mar (RSLR, por sus siglas en inglés) observado en las estaciones de mareas se entiende como una señal compuesta que surge de múltiples factores

withdrawal-induced subsidence is well documented in the Perth basin, where the Fremantle tide gauge is located (Featherstone *et al.*, 2012; Parker *et al.*, 2017) and subsidence in the Sydney area is also well documented (Garthwaite and Fuhrmann, 2020). Subsidence information for recent years is available from the Nevada Geodetic Laboratory.

MATERIALS AND METHODS

Conceptual framework and background

The mathematical approach utilized in this study models the subsidence velocity of tide gauge instruments by assuming a linear profile over the duration of the tide gauge record. This model posits an initial vertical velocity at the start of the record (x_s), often set to zero or informed by Glacial Isostatic Adjustment (GIA) models (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999). This initial velocity transitions linearly to the contemporary subsidence rate determined from Global Positioning System (GPS) data, which represents the vertical land motion (VLM) in recent years (Bell *et al.*, 2002; Burbey *et al.*, 2006; Abidin *et al.*, 2008; Baldi *et al.*, 2009; Blewitt *et al.*, 2009; Bock *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2014; Wang and Soler, 2015; Karegar *et al.*, 2016; Blewitt and Hammond, 2018; Hammond *et al.*, 2018; Rateb and Abotalib, 2020). Aspects of this methodology have been previously outlined and applied to long-term tide gauge records (Boretti, 2024a, 2024b).

Relative sea level rise (RSLR) observed at tide gauge stations is understood to be a composite signal arising from multiple factors (Parker, 2014). These include contributions from changes within the ocean body ("sea" contributors) like thermal expansion of seawater and meltwater input from land-based ice, alongside shifts in ocean circulation patterns. Equally important are "land" contributors, primarily vertical land motion encompassing various geological processes at the gauge site. Subsidence, the gradual or sudden sinking of the Earth's surface, significantly influences RSLR. It can stem from natural phenomena (tectonic activity, erosion, natural compaction, hydro-compaction, karst processes) or anthropogenic activities (groundwater extraction, mining, oil and gas exploitation, infrastructure loading). Often, these natural and anthropogenic drivers interact, potentially amplifying the overall subsidence, as documented in regions like the Mekong Delta due to groundwater withdrawal and compaction (Erban *et al.*, 2014;

(Parker, 2014). Estos incluyen contribuciones marinas como la expansión térmica del agua de mar y el aporte de agua de deshielo proveniente del hielo terrestre, junto con cambios en los patrones de circulación oceánica. Igualmente importantes son las contribuciones terrestres, principalmente el movimiento vertical de la tierra que abarca varios procesos geológicos en el sitio del medidor. El hundimiento, la subsidencia gradual o repentina de la superficie terrestre, influye significativamente en el ANMR. Puede derivar de fenómenos naturales (actividad tectónica, erosión, compactación natural, hidrocompactación, procesos kársticos) o actividades antropogénicas (extracción de agua subterránea, minería, explotación de petróleo y gas, carga de infraestructura). A menudo, estos factores naturales y antropogénicos interactúan, potencialmente amplificando la subsidencia general, como se ha documentado en regiones como el delta del Mekong debido a la extracción de agua subterránea y la compactación (Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2017, 2018) y el Golfo de México vinculado a la extracción de petróleo y la compactación (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014). Mientras que el aumento absoluto del nivel del mar (ASLR, por sus siglas en inglés), impulsado por el incremento del volumen de agua oceánica debido al deshielo y la expansión térmica causada por el calentamiento global, a menudo se aproxima utilizando una función cuadrática del tiempo, el hundimiento en sí también podría representarse razonablemente mediante un modelo cuadrático en una escala temporal relevante.

El análisis fiable de tendencias a largo plazo y aceleraciones en el nivel relativo del mar (RSL) requiere registros de datos extensos, típicamente superiores a 100 años, para resolver adecuadamente señales como las oscilaciones cuasi-60 años (Boretti, 2012, Parker, 2013a, 2013b, 2014). Sin embargo, los datos de subsidencia de alta precisión, principalmente de GPS, están disponibles predominantemente solo para las décadas recientes. Este desajuste temporal presenta un desafío significativo para integrar de manera integral los efectos de la subsidencia en la evaluación de los cambios del nivel del mar a largo plazo derivados de los registros históricos de mareógrafos.

Fuentes de Datos

Datos del nivel relativo del mar: Los datos mensuales promedio del nivel medio del mar se obtuvieron del repositorio en línea del Servicio Permanente para el Nivel Medio del Mar (PSMSL) (www.psmsl.org).

Minderhoud *et al.*, 2017, 2018) and the Gulf of Mexico linked to oil extraction and compaction (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014). While absolute sea level rise (ASLR), driven by increasing ocean water volume from ice melt and thermal expansion due to global warming, is often approximated using a quadratic function of time, subsidence itself might also be reasonably represented by a quadratic model over relevant timescale.

Reliable analysis of long-term trends and accelerations in RSL necessitates long data records, typically exceeding 100 years, to adequately resolve signals such as quasi-60-year oscillations (Boretti, 2012, Parker, 2013a, 2013b, 2014). However, high-precision subsidence data, mainly from GPS, is predominantly available only for recent decades. This temporal mismatch presents a significant challenge in comprehensively integrating subsidence effects into the assessment of long-term sea level changes derived from historical tide gauge records.

Data Sources

Relative sea level data: Monthly average mean sea level data were obtained from the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) online repository (www.psmsl.org). PSMSL provides quality-controlled, long-term tide gauge records from a global network. The tide gauge data set from PSMSL (Holgate *et al.*, 2013) for Fremantle is obtained from PSMSL (2024a) and the data from Sydney is obtained from PSMSL (2024b, 2024c).

Vertical land motion data (GPS): Processed GPS data, specifically vertical station velocities and associated time series information, were acquired from the Nevada Geodetic Laboratory (NGL) data portal (geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations). NGL processes raw data from a vast global network of continuous GPS stations. Their solutions incorporate rigorous corrections for numerous potential error sources inherent in satellite geodesy. These corrections account for factors such as satellite orbital inaccuracies, satellite and receiver clock drifts, atmospheric delays (ionospheric and tropospheric), solid Earth tides, ocean tide loading, atmospheric pressure loading, and antenna phase center variations, among others. This extensive processing is crucial for deriving the high-precision station coordinates and velocities needed for VLM studies. The processing of GPS information is described in Blewitt and Hammond (2018).

psmsl.org). PSMSL proporciona registros de mareógrafos a largo plazo con control de calidad de una red global. Los datos del mareógrafo de PSMSL (Holgate *et al.*, 2013) para Fremantle se obtienen de PSMSL (2024a) y los datos de Sídney se obtienen de PSMSL (2024b, 2024c).

Datos de movimiento vertical del terreno (GPS): Los datos de GPS procesados, específicamente las velocidades verticales de las estaciones y la información asociada de series temporales, se obtuvieron del portal de datos del Laboratorio Geodésico de Nevada (NGL) (geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations). NGL procesa datos sin procesar de una vasta red global de estaciones GPS continuas. Sus soluciones incorporan correcciones rigurosas para numerosas fuentes potenciales de error inherentes a la geodesia satelital. Estas correcciones tienen en cuenta factores como inexactitudes orbitales de los satélites, desviaciones de los relojes de los satélites y receptores, retrasos atmosféricos (ionosféricos y troposféricos), mareas terrestres sólidas, carga de mareas oceánicas, carga de presión atmosférica y variaciones del centro de fase de la antena, entre otros. Este procesamiento extenso es crucial para obtener las coordenadas y velocidades de estación de alta precisión necesarias para los estudios de VLM. El procesamiento de la información GPS se describe en Blewitt y Hammond (2018).

Tres ubicaciones GPS en Perth alrededor de la localidad de Fremantle a distancias relativamente grandes de unos pocos kilómetros desde el mareógrafo, NGL (2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f, 2014g, 2024h, 2024i) son consideradas para Fremantle. La serie temporal de GPS para Sídney está en la ubicación exacta del mareógrafo de Fort Denison, NGL (2024j).

Procesamiento y análisis de datos

Sea y la posición del nivel medio del mar medida por un mareógrafo, registrada durante un intervalo de tiempo desde $x_{s,y}$ hasta $x_{e,y}$. Sea z la posición vertical del instrumento del mareógrafo (o un punto de referencia representativo cercano) en un marco de referencia absoluto, determinado durante un intervalo de tiempo desde $x_{s,z}$ hasta $x_{e,z}$. Las series temporales tanto para RSL (y) como para VLM (z) pueden aproximarse utilizando ajustes polinómicos de segundo orden:

$$y = c_{2y} \times x^2 + c_{1y} \times x + c_{0y} \quad (1)$$

Three GPS locations in Perth around the Fremantle location at relatively large distances of a few kilometers from the tide gauge, NGL (2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f, 2014g, 2024h, 2024i) are considered for Fremantle. The GPS time series for Sydney is in the exact tide gauge location of Fort Denison, NGL (2024j).

Data processing and analysis

Let y be the position of the mean sea level measured by a tide gauge, recorded over a time interval from $x_{s,y}$ to $x_{e,y}$. Let z be the vertical position of the tide gauge instrument (or a representative nearby benchmark) in an absolute reference frame, determined over a time interval from $x_{s,z}$ to $x_{e,z}$. The time series for both RSL (y) and VLM (z) can be approximated using second-order polynomial fittings:

$$\begin{aligned} y &= c_{2y} \times x^2 + c_{1y} \times x + c_{0y} \quad (1) \\ z &= c_{2z} \times x^2 + c_{1z} \times x + c_{0z} \quad (2) \end{aligned}$$

where x represents time (typically in years), and c_{2y} , c_{1y} , c_{0y} , c_{2z} , c_{1z} , c_{0z} are the respective fitting coefficients.

The average velocity of the relative sea level (v_y) and the tide gauge (v_z) over their respective fitting periods are calculated from these coefficients as:

$$\begin{aligned} v_y &= c_{2y} \times (x_{e,y} + x_{s,y}) + c_{1y} \quad (3) \\ v_z &= c_{2z} \times (x_{e,z} + x_{s,z}) + c_{1z} \quad (4) \end{aligned}$$

Similarly, the average acceleration of the relative sea level (a_y) and the tide gauge (a_z) are:

$$\begin{aligned} a_y &= 2 \times c_{2y} \quad (5) \\ a_z &= 2 \times c_{2z} \quad (6) \end{aligned}$$

Typically, y and z are expressed in mm, and x in years, resulting in velocities (v) in mm/yr and accelerations (a) in mm/yr².

Integrating RSL and VLM data

The conventional method of estimating ASLR by simply subtracting the VLM rate from the RSL rate ($v_y - v_z$) is only valid if both accelerations, a_y and a_z , are zero (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011). Since accelerations are generally non-zero, this simple correction is often inaccurate. Applying the polynomial approach

$$z = c_{2z} \times x^2 + c_{1z} \times x + c_{0z} \quad (2)$$

donde x representa el tiempo (típicamente en años), y c_{2y} , c_{1y} , c_{0y} , c_{2z} , c_{1z} , c_{0z} son los respectivos coeficientes de ajuste.

La velocidad promedio del nivel relativo del mar (v_y) y del mareógrafo (v_z) durante sus respectivos períodos de ajuste se calcula a partir de estos coeficientes como:

$$v_y = c_{2y} \times (x_{e,y} + x_{s,y}) + c_{1y} \quad (3)$$

$$v_z = c_{2z} \times (x_{e,z} + x_{s,z}) + c_{1z} \quad (4)$$

De manera similar, la aceleración promedio del nivel relativo del mar (a_y) y del mareógrafo (a_z) son:

$$a_y = 2 \times c_{2y} \quad (5)$$

$$a_z = 2 \times c_{2z} \quad (6)$$

Típicamente, y y z se expresan en mm, y x en años, resultando en velocidades (v) en mm/año y aceleraciones (a) en mm/año².

Integrando datos de RSL y VLM

El método convencional de estimar ASLR simplemente restando la tasa de VLM de la tasa de RSL ($v_y - v_z$) solo es válido si ambas aceleraciones, a_y y a_z , son cero (Wöppelmann et al., 2007, 2011). Dado que las aceleraciones generalmente no son cero, esta simple corrección a menudo es inexacta. La aplicación del enfoque polinomial (Ecuaciones 1-6) produce resultados más fiables cuando los tiempos de inicio y finalización para y y z son idénticos ($x_{s,y} = x_{s,z}$ y $x_{e,y} = x_{e,z}$). Sin embargo, esta condición rara vez se cumple debido a las diferentes longitudes de los registros de mareógrafos y GPS.

Acoplar información de mareógrafos con monitoreo GPS es crucial para un análisis robusto de tendencias del nivel del mar (Boretti, 2022a, 2022b). Contabilizar adecuadamente la aceleración tanto de los niveles relativos del mar (a_y) como de la subsidencia (a_z) es obligatorio para obtener resultados precisos. Mientras que los movimientos geológicos lentos y a largo plazo como el GIA (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999) influyen principalmente en la velocidad base del VLM y pueden no afectar significativamente a la aceleración calculada durante la escala temporal de los registros típicos, los cambios abruptos del VLM (por ejemplo, debido a terremotos) y la subsiguiente deformación

(Equations 1-6) yields more reliable results when the start and end times for both y and z are identical ($x_{s,y} = x_{s,z}$ and $x_{e,y} = x_{e,z}$). However, this condition is rarely met due to the differing lengths of tide gauge and GPS records.

Coupling information from tide gauges with GPS monitoring is crucial for robust sea level trend analysis (Boretti, 2022a, 2022b). Properly accounting for the acceleration of both the relative sea levels (a_y) and the subsidence (a_z) is mandatory for accurate results. While long-term, slow geological movements like GIA (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999) primarily influence the baseline VLM velocity and may not significantly affect the computed acceleration over the timescale of typical records, abrupt VLM changes (e.g., due to earthquakes) and subsequent post-seismic deformation require specific, careful consideration (Parker et al., 2018).

A critical issue is the disparity in record lengths: while the end times are often comparable ($x_{e,y} \approx x_{e,z}$), the start time of the GPS record is typically much later than the tide gauge record ($x_{s,y} \ll x_{s,z}$). To address this, the following procedure is employed:

The long RSL time series (y) from PSMSL is processed using a parabolic fitting (Equation 1) to determine the coefficients c_{0y} , c_{1y} , and c_{2y} . These are then used to calculate v_y and a_y (Equations 3 and 5) over the full tide gauge record length ($x_{s,y}$ to $x_{e,y}$).

For the VLM (z), the contemporary linear velocity ($v_{z,GPS}$) is obtained from the NGL processed GPS data (derived typically via linear fitting of the recent GPS position time series). The historical velocity at the start of the tide gauge record ($v_{z,GIA}$) is estimated from GIA models.

These two velocities are assumed to represent the instantaneous VLM velocity at the start ($x_{s,z} \approx x_{s,y}$) and end ($x_{e,z} \approx x_{e,y}$) of the modeled VLM period (which corresponds to the tide gauge period).

$$v_{z,GPS} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} + c_{1z} \quad (7, \text{ interpretation of Eq. 4 at endpoint})$$

$$v_{z,GIA} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{s,z} + c_{1z} \quad (8, \text{ interpretation of Eq. 4 at startpoint})$$

Solving equations (7) and (8) simultaneously allows for the calculation of the VLM quadratic coefficients (c_{2z} and c_{1z}) that define the VLM model over the entire tide gauge period:

$$2 \times c_{2z} = (v_{z,GPS} - v_{z,GIA}) / (x_{e,z} - x_{s,z}) \quad (9)$$

post-sísmica requieren una consideración específica y cuidadosa (Parker *et al.*, 2018).

Un problema crítico es la disparidad en la longitud de los registros: mientras que los tiempos finales son a menudo comparables ($x_{e,y} \approx x_{e,z}$), el tiempo de inicio del registro GPS es típicamente mucho más tardío que el registro del mareógrafo ($x_{s,y} \ll x_{s,z}$). Para abordar esto, se emplea el siguiente procedimiento:

La larga serie temporal de RSL (y) de PSMSL se procesa utilizando un ajuste parabólico (Ecuación 1) para determinar los coeficientes c_{0y} , c_{1y} y c_{2y} . Estos se utilizan luego para calcular v_y y a_y (Ecuaciones 3 y 5) a lo largo de toda la longitud del registro del mareógrafo ($x_{s,y}$ a $x_{e,y}$).

Para el VLM (z), la velocidad lineal contemporánea ($v_{z,GPS}$) se obtiene a partir de los datos GPS procesados por NGL (derivados típicamente mediante ajuste lineal de las series temporales de posición GPS recientes). La velocidad histórica al inicio del registro del mareógrafo ($v_{z,GIA}$) se estima a partir de modelos de GIA. Se asume que estas dos velocidades representan la velocidad instantánea del VLM al inicio ($x_{s,z} \approx x_{s,y}$) y al final ($x_{e,z} \approx x_{e,y}$) del período modelado de VLM (que corresponde al período del mareógrafo).

$$v_{z,GPS} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} + c_{1z} \quad (7, \text{interpretación de Ec. 4 en el punto final})$$

$$v_{z,GIA} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{s,z} + c_{1z} \quad (8, \text{interpretación de Ec. 4 en el punto inicial})$$

Resolver las ecuaciones (7) y (8) simultáneamente permite el cálculo de los coeficientes cuadráticos del VLM (c_{2z} y c_{1z}) que definen el modelo VLM durante todo el período del mareógrafo:

$$2 \times c_{2z} = (v_{z,GPS} - v_{z,GIA}) / (x_{e,z} - x_{s,z}) \quad (9)$$

$$c_{1z} = v_{z,GPS} - 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} \quad (10)$$

Con c_{1z} y c_{2z} determinados, la velocidad promedio del VLM (v_z) y la aceleración (a_z) durante el período completo ($x_{s,z}$ a $x_{e,z}$) pueden calcularse utilizando las Ecuaciones 4 y 6. Finalmente, se calculan la velocidad ASLR ($v_{yz} = v_y - v_z$) y la aceleración ($a_{yz} = a_y - a_z$). Al acoplar y y z, c_{0z} puede finalmente calcularse considerando el mismo punto de partida en $x_{s,z} = x_{s,y}$.

Calidad de los datos y consideraciones estadísticas

$$c_{1z} = v_{z,GPS} - 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} \quad (10)$$

With c_{1z} and c_{2z} determined, the average VLM velocity (v_z) and acceleration (a_z) over the full period ($x_{s,z}$ to $x_{e,z}$) can be calculated using Equations 4 and 6. Finally, the ASLR velocity ($v_{yz} = v_y - v_z$) and acceleration ($a_{yz} = a_y - a_z$) are computed. When coupling y and z, c_{0z} can be finally computed by considering same starting point at $x_{s,z} = x_{s,y}$.

Data quality and statistical considerations

The reliability of the final results depends fundamentally on the quality of the input data. Optimal data quality is achieved when measurements (both tide gauge and GPS) are collected systematically and continuously over long periods, without significant gaps or perturbing events (like instrument changes, benchmark disturbances, or major earthquakes not specifically accounted for). While the goodness-of-fit of the polynomial regressions provides a measure of how well the model describes the data, the inherent accuracy and representativeness of the PSMSL sea level records and the NGL VLM estimates are paramount. Uncertainties associated with the input data and the assumptions of the linear transition model for VLM velocity influence the uncertainty of the final ASLR results.

Statistical error metrics

Robust analysis requires in principle reporting statistical error metrics. A full analysis using polynomial fitting should include goodness-of-fit statistics (e.g., R^2 , adjusted R^2) to indicate how well the model explains the variance in the data, standard errors for each coefficient (c_0 , c_1 , c_2). The standard error for c_2 is particularly important, as it allows testing the statistical significance of the acceleration term ($a = 2 \times c_2$), confidence intervals for the derived average velocities (v) and accelerations (a). This provides a range within which the true value likely lies. In the case of sea level studies, the fitting accuracy is however much less relevant than the reliability of the underlying data and it is mostly omitted.

RESULTS

The proposed method has been previously applied to the tide gauge location of Sydney Fort Denison (Boretti, 2024c) and it is

La fiabilidad de los resultados finales depende fundamentalmente de la calidad de los datos de entrada. La calidad óptima de los datos se logra cuando las mediciones (tanto del mareógrafo como del GPS) se recopilan de manera sistemática y continua durante largos períodos, sin brechas significativas o eventos perturbadores (como cambios de instrumentos, alteraciones en los puntos de referencia o terremotos importantes que no se hayan tenido en cuenta específicamente). Mientras que la bondad de ajuste de las regresiones polinómicas proporciona una medida de cuán bien el modelo describe los datos, la precisión inherente, la representatividad de los registros del nivel del mar del PSMSL y las estimaciones de VLM de NGL son primordiales. Las incertidumbres asociadas con los datos de entrada y las suposiciones del modelo de transición lineal para la velocidad de VLM influyen en la incertidumbre de los resultados finales de ASLR.

Métricas de error estadístico

El análisis robusto requiere en principio informar métricas de error estadístico. Un análisis completo utilizando ajuste polinómico debe incluir estadísticas de bondad de ajuste (por ejemplo, R^2 , R^2 ajustado) para indicar qué tan bien el modelo explica la varianza en los datos, errores estándar para cada coeficiente (c_0 , c_1 , c_2). El error estándar para c_2 es particularmente importante, ya que permite probar la significancia estadística del término de aceleración ($a = 2 \times c_2$), intervalos de confianza para las velocidades promedio derivadas (v) y aceleraciones (a). Esto proporciona un rango dentro del cual probablemente se encuentra el valor verdadero. En el caso de los estudios del nivel del mar, la precisión del ajuste es, sin embargo, mucho menos relevante que la fiabilidad de los datos subyacentes y generalmente se omite.

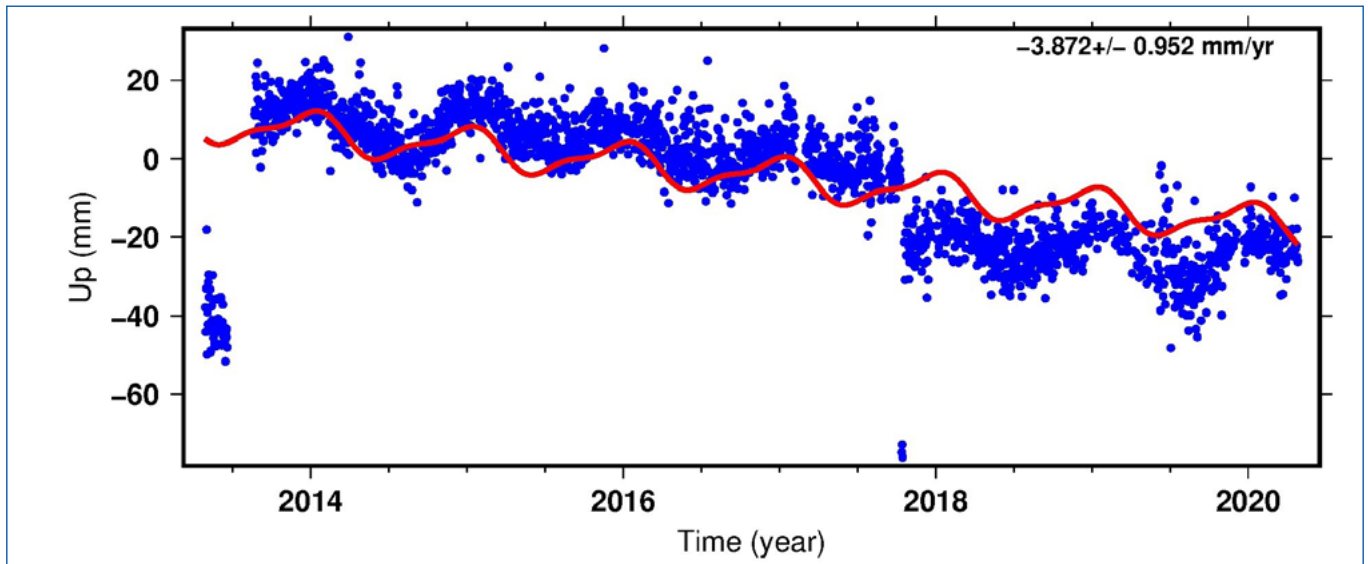
RESULTADOS

El método propuesto ha sido previamente aplicado a la ubicación del mareógrafo de Sydney Fort Denison (Boretti, 2024c) y ahora se aplica a la ubicación del mareógrafo de Fremantle. Sydney y Fremantle son los mareógrafos más antiguos y mejor mantenidos del Hemisferio Sur, en áreas mínimamente afectadas por el movimiento cortical a finales del siglo XIX cuando los dos mareógrafos comenzaron a registrar datos. La Figura 1 presenta la posición vertical absoluta de todas las cúpulas alrededor

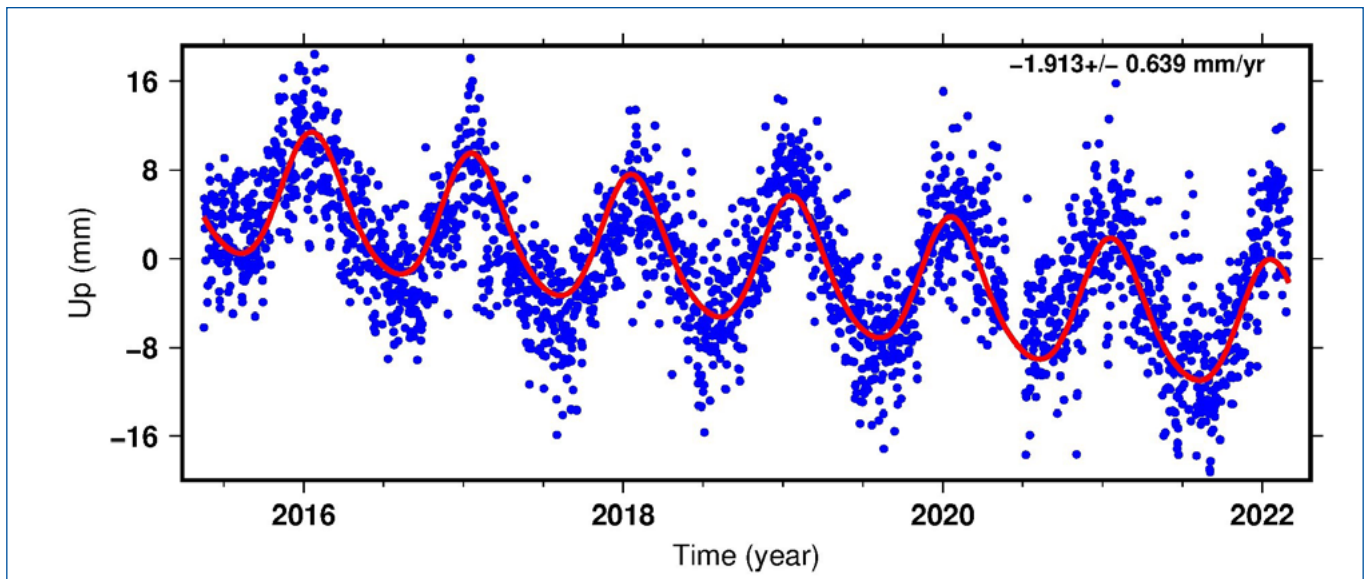
now applied to the tide gauge location of Fremantle. Sydney and Fremantle are the longest and better-maintained tide gauges of the Southern Hemisphere, in areas minimally affected by crustal motion at the end of the 1800s when the two tide gauges started recording. Figure 1 presents the absolute vertical position of all the domes around the Fremantle tide gauges with computation of the subsidence rate based on a sufficient number of years. Those results computed based on a longer time span are generally more reliable.

de los mareógrafos de Fremantle con el cálculo de la tasa de hundimiento basado en un número suficiente de años. Esos resultados calculados en base a un período de tiempo más largo son generalmente más confiables.

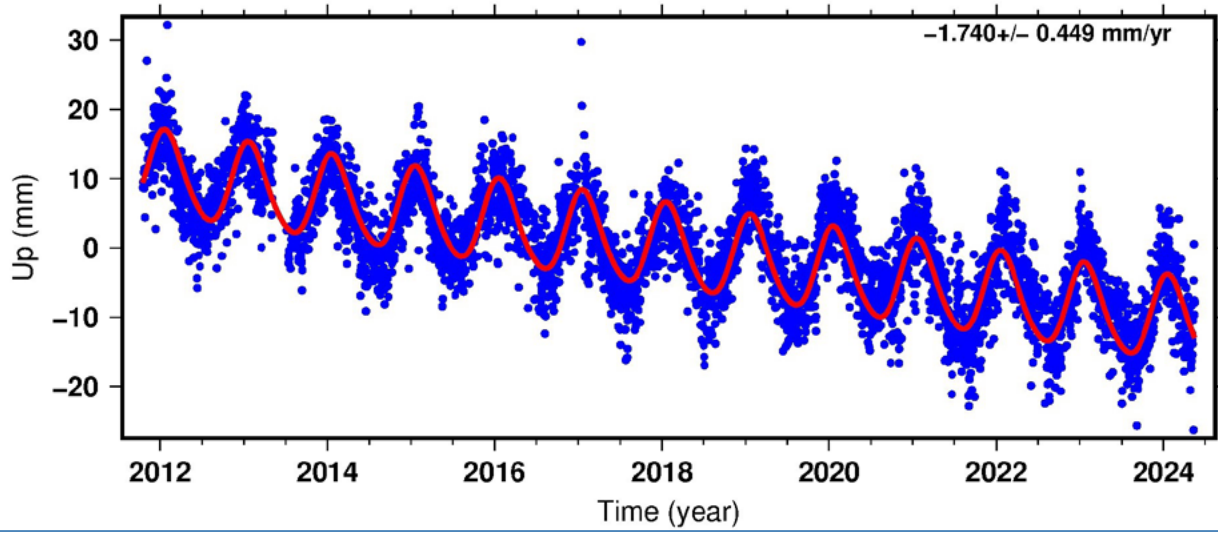
Los datos del GPS sugieren para el mareógrafo de Fremantle, un



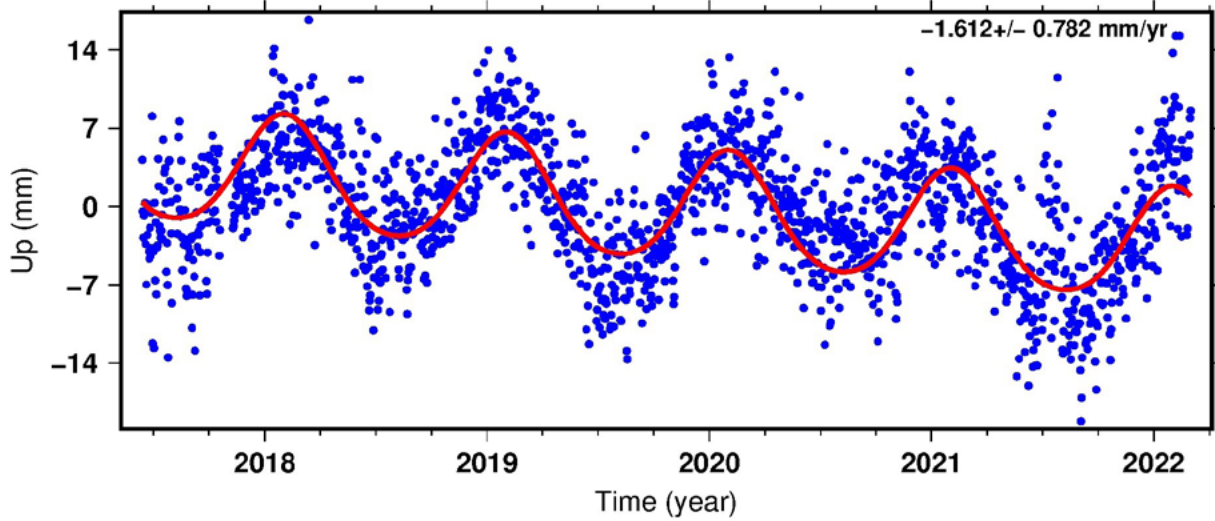
(a) WLT1



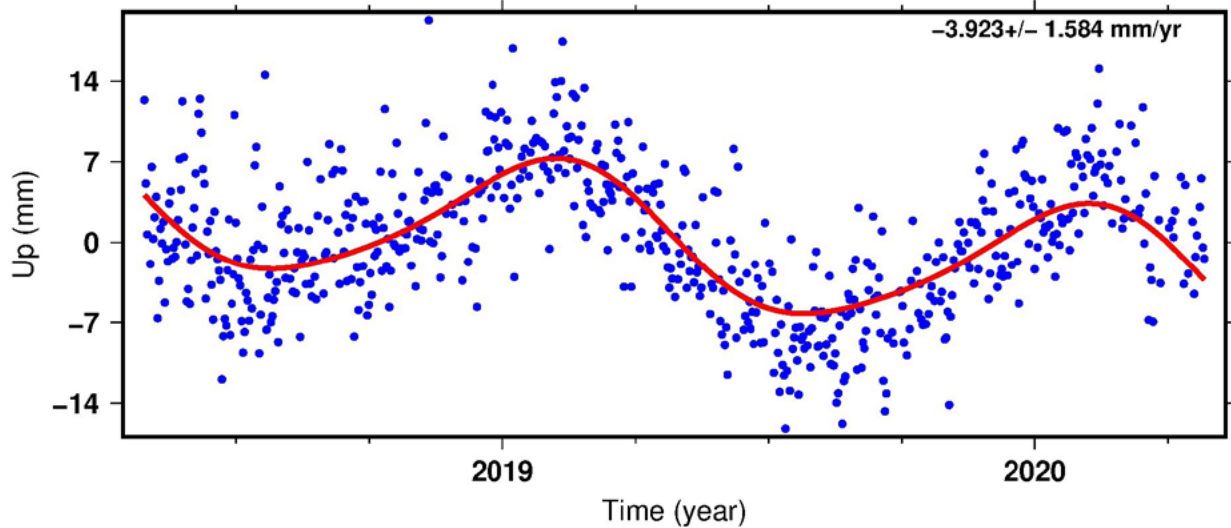
(b) SPA8



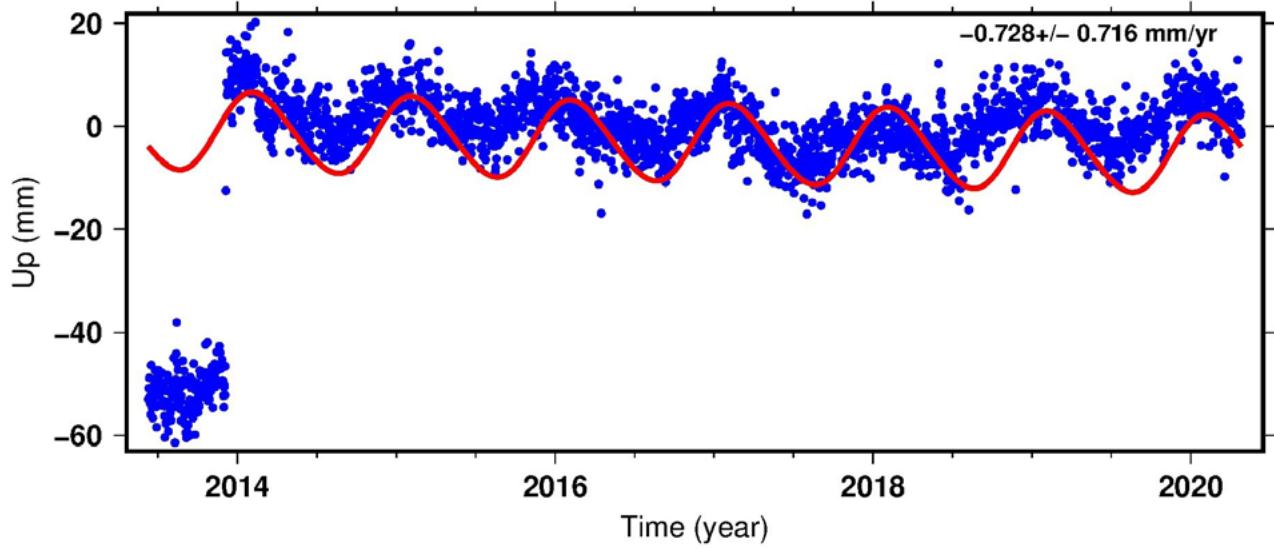
(c) CUTA



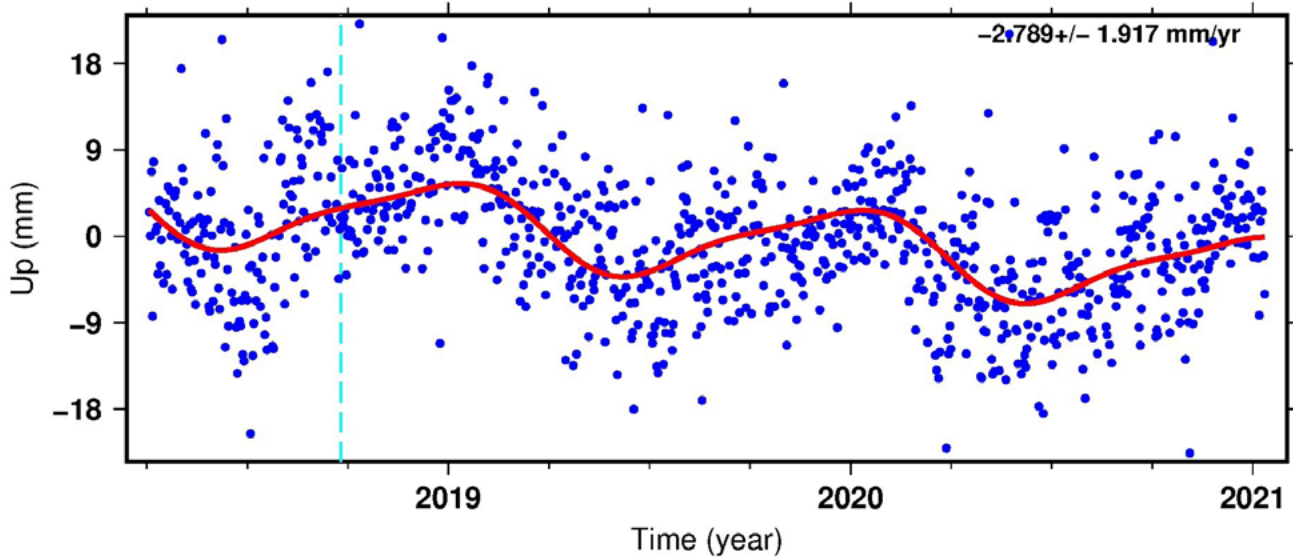
(d) UWA0



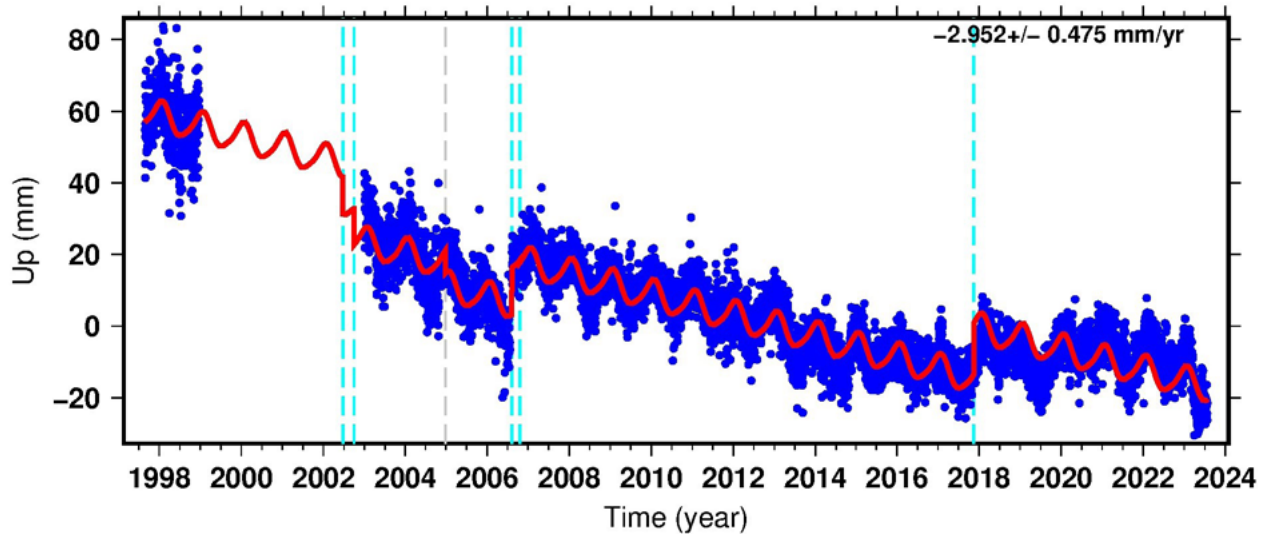
(e) HEN2



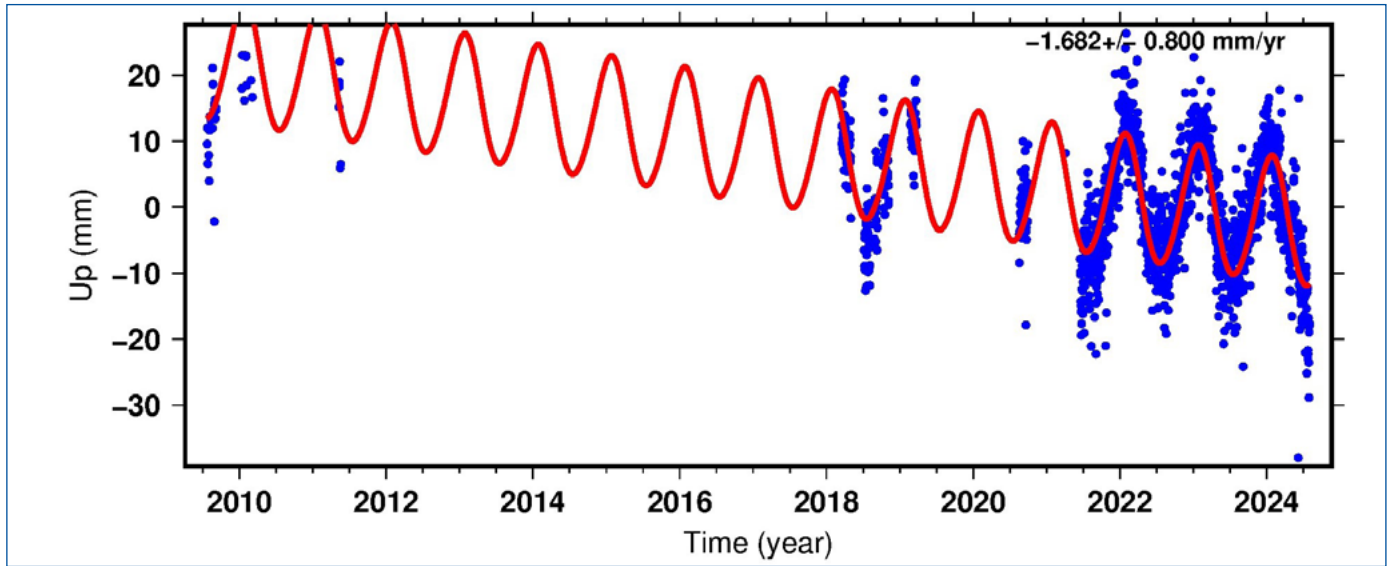
(f) BLMT



(g) BALC



(h) HIL1



(i) MIDL

Figura 1 – Series temporales de GPS para domos alrededor de Fremantle. Las posiciones de 24 horas utilizando órbitas finales se muestran en azul, y las órbitas rápidas en rojo. En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en mm (z). En azul se muestran las posiciones de 24 horas utilizando órbitas finales y en rojo se utilizan las órbitas rápidas. Imágenes descargadas de geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations el 28 de enero de 2025. Crédito NGL.

hundimiento reciente de $v_z = -3.13$ mm/año, que es mucho mayor que el hundimiento reciente en Fort Denison, estimado en $v_z = -1.60$ mm/año. Vale la pena mencionar que los datos GPS de Fort Denison, Sídney, abarcan aproximadamente una década. En el caso de las cúpulas GPS alrededor de Fremantle, la cobertura temporal es menor, en promedio 4-5 años.

El análisis clásico del nivel relativo del mar para Sydney Fort Denison y Fremantle se puede encontrar en sealevel.info, sealevel.info (2024a, 2024b). El enfoque usado aquí es similar, basado en los mismos datos, pero diferente de rellenar los vacíos interpolando meses vecinos.

En Fremantle, la velocidad del nivel relativo del mar es $v_y = +1.80$ mm/año, y la aceleración del nivel relativo del mar $a_y = +0.01220$ mm/año². En Sídney, la velocidad del nivel relativo del mar es $v_y = +0.80$ mm/año y la aceleración del nivel relativo del mar es $a_y = +0.0200$ mm/año².

Como se discutió en la sección de métodos, Fremantle tiene un perfil lineal para la velocidad vertical, que crece desde 0 en el tiempo x_s del mareógrafo, hasta -3.13 mm/año en el tiempo x_e del mareógrafo. Dados $x_s = 1897.042$ y $x_e = 2022.958$, es:

$$v_z = -3.13/2 = -1.56 \text{ mm/año} \quad (11)$$

Figure 1 – GPS time series for domes around Fremantle. 24 hour positions using final orbits are in blue, and rapid orbits are in red. On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in mm (z). In blue are the 24h positions using final orbits and red is used for rapid orbits. Images downloaded from geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations on January 28, 2025. Credit NGL.

The GPS data suggests for the Fremantle tide gauge, a recent subsidence $v_z = -3.13$ mm/yr, which is much larger than the recent subsidence in Fort Denison, estimated at $v_z = -1.60$ mm/yr. It is worth mentioning as the GPS data for Fort Denison, Sydney spans about a decade. In the case of the GPS domes around Fremantle, the time coverage is less, on average 4-5 years.

The classic relative sea level analysis for Sydney Fort Denison and Fremantle may be found in sealevel.info, sealevel.info (2024a, 2024b). My approach is similar, based on the same data, but different from filling the gaps interpolating neighboring months.

In Fremantle, the relative sea level velocity is $v_y = +1.80$ mm/yr, and the relative sea level acceleration $a_y = +0.01220$ mm/yr². In Sydney, the relative sea level velocity is $v_y = +0.80$ mm/yr and the relative sea level acceleration is $a_y = +0.0200$ mm/yr².

As discussed in the methods section, Fremantle has a linear profile for the vertical velocity, growing from 0 at the time x_s of the tide gauge, to the -3.13 mm/yr at the time x_e of the tide gauge. Given $x_s = 1897.042$ and $x_e = 2022.958$, it is:

$$v_z = -3.13/2 = -1.56 \text{ mm/yr} \quad (11)$$

$$a_z = -3.13/(x_e - x_s) = -0.0249 \text{ mm/yr}^2 \quad (12)$$

$$a_z = -3.13/(x_e - x_s) = -0.0249 \text{ mm/año}^2 \quad (12)$$

Para Sídney, de manera similar, se asume un perfil lineal para la velocidad vertical, que crece desde 0 en el tiempo x_s del mareógrafo, hasta -1,6 mm/año en el tiempo x_e del mareógrafo. Dado que $x_s = 1886.042$ y $x_e = 2022.958$,

$$v_z = -1.60/2 = -0.80 \text{ mm/año} \quad (13)$$

$$a_z = -1.60/(x_e - x_s) = -0.0117 \text{ mm/año}^2 \quad (14)$$

Aunque GIA puede ser utilizado en diferentes ubicaciones para estimar el movimiento vertical de la tierra en zonas donde se sabe que GIA es relevante, en áreas bien conocidas por ser tectónicamente estables como Australia, donde la subsidencia por extracción de agua subterránea es un proceso que solo comenzó a principios de 1900, es más apropiado tomar como cero la velocidad de la tierra tanto en Sydney como en Fremantle a finales de 1800. No hay mucha diferencia si considera como inicial en el momento x_s del mareógrafo las velocidades verticales del modelo GIA de Peltier, ya que son -0,09 mm/año y 0,00 mm/año en Sydney, y -0,02 mm/año y 0,04 mm/año en Fremantle, respectivamente en VM2 y VM4 (Peltier, 2004).

De manera similar, en Fremantle, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +1.72 - 1.56 = +0.16 \text{ mm/año} \quad (15)$$

sometido a una aceleración:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0146 - 0.0249 = -0.0103 \text{ mm/año}^2 \quad (16)$$

De manera similar, en Sídney, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +0.82 - 0.80 = +0.02 \text{ mm/año} \quad (17)$$

sometido a una aceleración:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0200 - 0.0117 = +0.0083 \text{ mm/año}^2 \quad (18)$$

La **Figura 2** presenta las series temporales para el nivel relativo del mar y_{TG} , el desplazamiento por subsidencia z_{GPS} y z_{model} , y el nivel absoluto del mar $y_{TG} + z_{model}$ para Fremantle y Sídney.

El creciente hundimiento en Fremantle, al igual que en Fort

For Sydney, similarly, I assume a linear profile for the vertical velocity, growing from 0 at the time x_s of the tide gauge, to the -1.6 mm/yr at the time x_e of the tide gauge. Since $x_s = 1886.042$ and $x_e = 2022.958$,

$$v_z = -1.60/2 = -0.80 \text{ mm/yr} \quad (13)$$

$$a_z = -1.60/(x_e - x_s) = -0.0117 \text{ mm/yr}^2 \quad (14)$$

While GIA may be used in different locations to estimate the vertical motion of the land in zones where GIA is known to be relevant, in zones well known to be tectonically stable such as Australia where subsidence from groundwater extraction is a process which only started in the early 1900s, it is more appropriate to take as zero the velocity of the land in both Sydney and Fremantle at the end of 1800s. There is not too much difference if we consider as initial at the time x_s of the tide gauge the vertical velocities from the Peltier GIA model, as they are -0.09 mm/yr and 0.00 mm/yr in Sydney, and -0.02 mm/yr and 0.04 mm/yr in Fremantle, respectively in VM2 and VM4 (Peltier, 2004).

Similarly, in Fremantle, the absolute sea levels have grown at a velocity:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +1.72 - 1.56 = +0.16 \text{ mm/yr} \quad (15)$$

subjected to an acceleration:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0146 - 0.0249 = -0.0103 \text{ mm/yr}^2 \quad (16)$$

Similarly, in Sydney, the absolute sea levels have grown at a velocity:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +0.82 - 0.80 = +0.02 \text{ mm/yr} \quad (17)$$

subjected to an acceleration:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0200 - 0.0117 = +0.0083 \text{ mm/yr}^2 \quad (18)$$

Figure 2 presents the time series for relative sea level y_{TG} , the subsidence displacement z_{GPS} and z_{model} , and the absolute sea level $y_{TG} + z_{model}$ for Fremantle and Sydney.

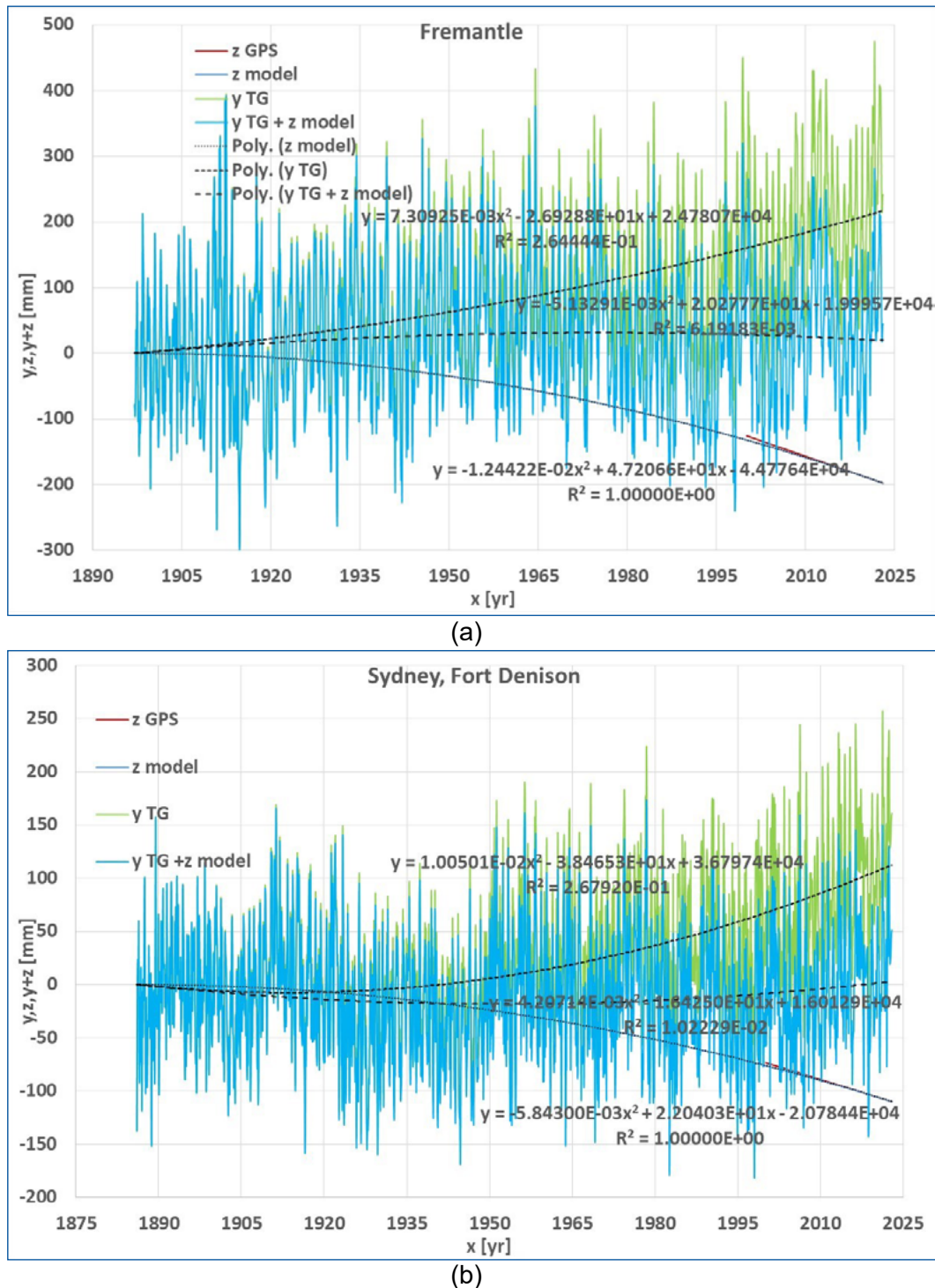


Figura 2. Niveles del mar medidos por el mareógrafo (y_{TG}), subsidencia modelada del mareógrafo (z_{model}), y su suma ($y+z$) para Fremantle (a) y Sydney Fort Denison (b) vs. tiempo. El gráfico también muestra la subsidencia medida para el mareógrafo (z_{GPS}). En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en mm de los niveles del mar (y) y del mareógrafo (z).

Figure 2. Sea levels measured by the tide gauge (y_{TG}), modeled subsidence of the tide gauge (z_{model}), and their sum ($y+z$) for Fremantle (a) and Sydney Fort Denison (b) vs. time. The graph also shows the subsidence measured for the tide gauge (z_{GPS}). On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in mm of the sea levels (y) and the tide gauge (z).

Denison de Sídney, también está respaldado por los datos de altimetría satelital CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/. Más información sobre los niveles del mar de Sídney se propone en Boretti (2024c). Se propone un patrón similar a lo largo de las costas este y oeste de Australia, en los océanos Índico y Pacífico.

The growing subsidence in Fremantle, same as Sydney Fort Denison, is also supported by CCAR satellite altimetry data, ccar.colorado.edu/altimetry/. Further information about the sea levels of Sydney is proposed in Boretti (2024c). A similar pattern is proposed along the east and west coast of Australia, in the

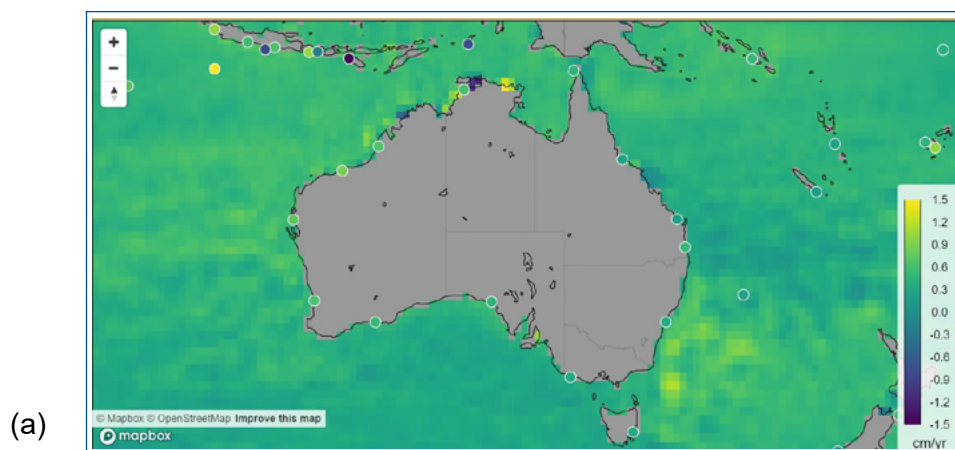
Al utilizar el explorador del nivel del mar de CCAR, frente al mareógrafo de Fremantle, el nivel absoluto del mar ha estado creciendo desde 1993 a una tasa de 2,8 mm/año, mientras que el nivel relativo del mar en el mareógrafo está creciendo a una tasa de 4,4 mm/año, lo que sugiere una tasa de subsidencia de 1,6 mm/año. Al utilizar CCAR, frente al mareógrafo de Fort Denison en Sídney, el nivel absoluto del mar ha estado creciendo desde 1993 a una tasa de 2,9 mm/año, mientras que el nivel relativo del mar en el mareógrafo está creciendo a una tasa de 3,4 mm/año, lo que sugiere una tasa de subsidencia de 0,5 mm/año. Estos valores están muy por debajo de los últimos valores de subsidencia inferidos por GPS basados en menos de 10 años de datos.

La [Figura 3](#) compara los niveles del mar absolutos (cálculo apoyado por satélite) y relativos (mareógrafo) frente a Sídney y Fremantle desde 1993 (de CCAR). La comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Sídney muestra que la tasa relativa de elevación es mayor, 3,4 frente a 2,9 mm/año en el período corto, ya que podría ser el resultado de un hundimiento a una tasa de 0,5 mm/año. La comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Fremantle muestra que la tasa relativa de elevación es mayor, 4,4 frente a 2,8 mm/año, lo que podría ser el resultado de un hundimiento a una tasa de 1,6 mm/año. El análisis CCAR se basa en un registro corto que abarca solo 30 años, lo cual es inadecuado para evaluar las tasas de aumento del nivel del mar dada la presencia de oscilaciones cuasi-60 años. Esto explica la diferencia frente a la evaluación en la [Figura 2](#). Estos resultados son consistentes, en lo que respecta a la subsidencia, con el análisis previo.

Indian and Pacific Oceans.

By using the sea level explorer by CCAR, in front of the Fremantle tide gauge the absolute sea level has been growing since 1993 at a rate of 2.8 mm/yr, while the relative sea level at the tide gauge is growing at a rate of 4.4 mm/yr, suggesting a subsidence rate of 1.6 mm/yr. By using CCAR, in front of the Sydney Fort Denison tide gauge the absolute sea level has been growing since 1993 at a rate of 2.9 mm/yr, while the relative sea level at the tide gauge is growing at a rate of 3.4 mm/yr, suggesting a subsidence rate of 0.5 mm/yr. These values are well below the latest values of GPS-inferred subsidence based on less than 10 years of data.

[Figure 3](#) compares the absolute (satellite-supported computation) and relative (tide gauge) sea levels in front of Sydney and Fremantle since 1993 (from CCAR). The comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Sydney shows the relative rate of rise is larger, 3.4 vs. 2.9 mm/yr over the short window, as it could be the result of subsidence at a rate of 0.5 mm/yr. The comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Fremantle shows the relative rate of rise is larger, 4.4 vs. 2.8 mm/yr, as it could be the result of subsidence at a rate of 1.6 mm/yr. The CCAR analysis is based on a short record spanning only 30 yr, which are inadequate to assess sea level rates of rise given the presence of the quasi-60 years oscillations. This explains the difference vs. the assessment in [Figure 2](#). These results are consistent, for what concerns subsidence, with the prior analysis.



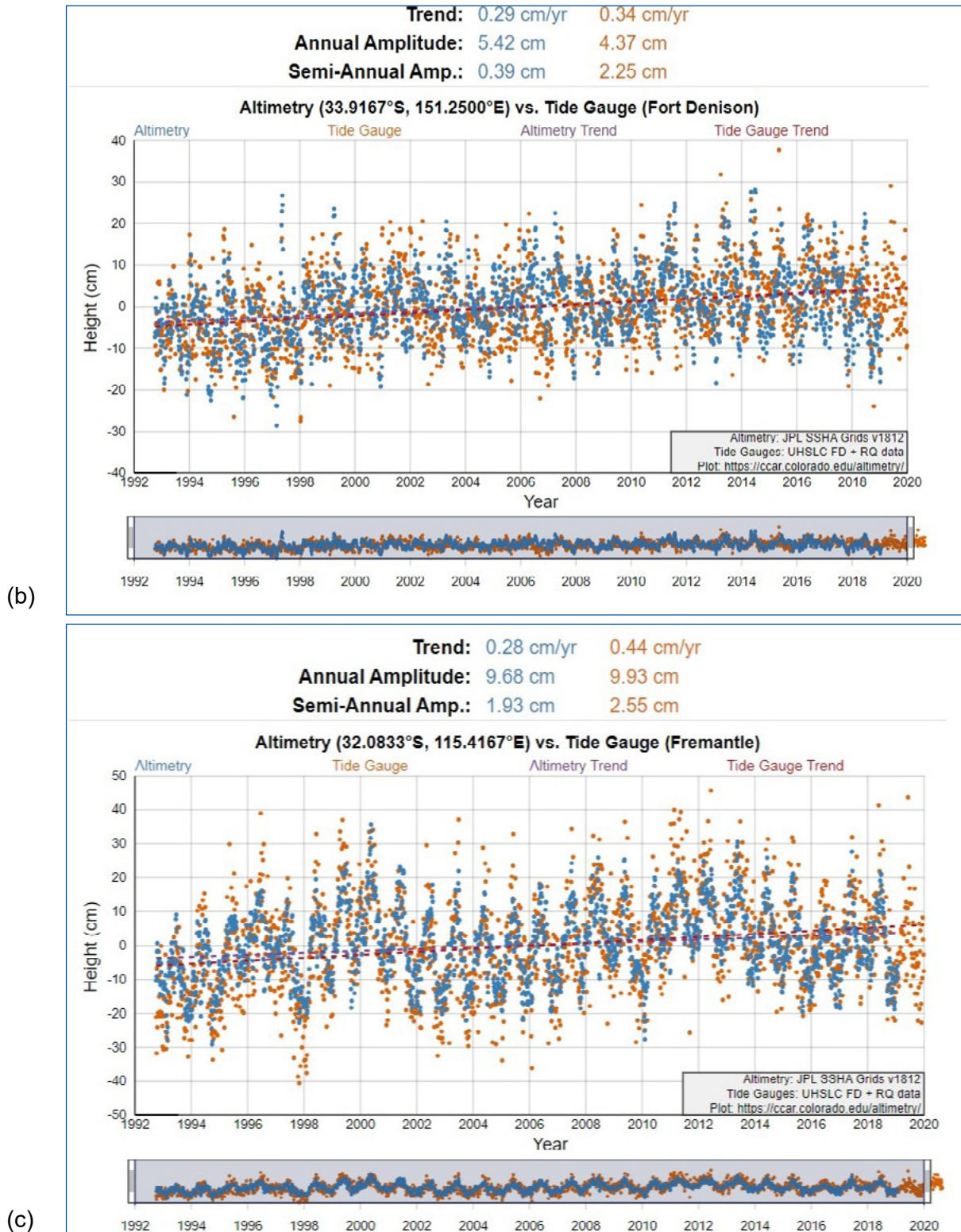


Figura 3. Comparación de los niveles del mar absolutos (cálculo apoyado por satélite) y relativos (mareógrafo) frente a Sidney y Fremantle desde 1993 (de CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/). (a) Mapa de las tasas absolutas de elevación a través de los océanos alrededor de Australia y ubicación de los mareógrafos de referencia. (b) Comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Sidney. (c) Comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Fremantle. En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en cm de los niveles del mar (y) medidos por mareógrafo y altimetría satelital. Crédito CCAR.

Figure 3. Comparison of absolute (satellite-supported computation) and relative (tide gauge) sea levels in front of Sydney and Fremantle since 1993 (from CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/). (a) Map of absolute rates of rise across the oceans around Australia and location of reference tide gauges. (b) Comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Sydney. (c) Comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Fremantle. On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in cm of the sea levels (y) by tide gauge and satellite altimetry. Credit CCAR.

DISCUSIÓN

Fundamento del uso de ajustes cuadráticos en los análisis del nivel del mar

La elección de modelar el Aumento Absoluto del Nivel del Mar (ASLR, por sus siglas en inglés) como una función cuadrática del tiempo está bien establecida en la literatura y está impulsada principalmente por la necesidad de capturar la aceleración observada en el aumento del nivel del mar, particularmente durante los siglos XX y XXI. El calentamiento global conduce a un aumento en las tasas tanto de expansión térmica del agua oceánica como de derretimiento del hielo terrestre (glaciares y capas de hielo). Como la tasa de calentamiento en sí no ha sido constante, la tasa de elevación del nivel del mar también ha cambiado. Un modelo lineal simple ($y = mt + c$) asume una tasa constante de aumento (m), lo cual es inconsistente con las observaciones en escalas temporales de décadas a siglos. Un modelo cuadrático ($y = at^2 + bt + c$) incorpora un término de aceleración constante ($2a$), que representa la forma matemática más simple de explicar una tasa de aumento cambiante dentro del período observado. Numerosos estudios que analizan registros a largo plazo de mareógrafos y altimetría satelital han detectado una aceleración positiva estadísticamente significativa en el nivel medio global del mar, lo que justifica el uso de modelos cuadráticos o no lineales de orden superior (por ejemplo, Douglas, 1992; Church y White, 2006, 2011; Jevrejeva *et al.*, 2008; Chambers *et al.*, 2012; Dangendorf *et al.*, 2017).

Aunque quizás menos universalmente aplicado que para ASLR, modelar la subsidencia con una función cuadrática puede ser razonable, especialmente cuando los factores antropogénicos dominan y se han intensificado con el tiempo. Como se señala en el texto de introducción proporcionado, factores como la extracción de aguas subterráneas, la explotación de recursos y la carga de infraestructura a menudo aumentan de manera no lineal durante períodos de desarrollo (por ejemplo, Kolker *et al.*, 2011; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2018). Si la tasa de estas actividades (y por lo tanto la tasa de subsidencia inducida) ha aumentado, un modelo cuadrático puede proporcionar un mejor ajuste empírico al movimiento resultante del terreno que un modelo lineal simple, capturando una aceleración (o desaceleración) en la tasa de subsidencia. El método específico en tu texto modela la velocidad linealmente, lo que implica una

DISCUSSION

Rationale behind the use of quadratic fittings in sea level analyses

The choice to model Absolute Sea Level Rise (ASLR) as a quadratic function of time is well-established in the literature and is primarily driven by the need to capture the observed acceleration in sea level rise, particularly during the 20th and 21st centuries. Global warming leads to increased rates of both thermal expansion of ocean water and melting of land-based ice (glaciers and ice sheets). As the rate of warming itself has not been constant, the rate of sea level rise has also changed. A simple linear model ($y = mt + c$) assumes a constant rate of rise (m), which is inconsistent with observations over multi-decadal to century timescales. A quadratic model ($y = at^2 + bt + c$) incorporates a constant acceleration term ($2a$), representing the simplest mathematical way to account for a changing rate of rise within the observed period. Numerous studies analyzing long-term tide gauge and satellite altimetry records have detected statistically significant positive acceleration in global mean sea level, justifying the use of quadratic or higher-order non-linear models (e.g., Douglas, 1992; Church and White, 2006, 2011; Jevrejeva *et al.*, 2008; Chambers *et al.*, 2012; Dangendorf *et al.*, 2017).

While perhaps less universally applied than for ASLR, modeling subsidence with a quadratic function can be reasonable, especially when anthropogenic drivers dominate and have intensified over time. As noted in the introduction text provided, factors like groundwater extraction, resource exploitation, and infrastructure loading often increase non-linearly during periods of development (e.g., Kolker *et al.*, 2011; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2018). If the rate of these activities (and thus the rate of induced subsidence) has increased, a quadratic model can provide a better empirical fit to the resulting land motion than a simple linear model, capturing an acceleration (or deceleration) in the subsidence rate. The specific method in your text models the velocity linearly, which implies a quadratic function for the position (z), explicitly calculating a constant acceleration (az).

While processes driven by positive feedback loops can exhibit exponential growth, quadratic models are often preferred for analyzing geophysical time series like sea level for several

función cuadrática para la posición (z), calculando explícitamente una aceleración constante (az).

Mientras que los procesos impulsados por bucles de retroalimentación positiva pueden exhibir un crecimiento exponencial, los modelos cuadráticos suelen ser preferidos para analizar series temporales geofísicas como el nivel del mar por varias razones. Los modelos cuadráticos son el siguiente paso en complejidad después de los modelos lineales y proporcionan directamente un término de aceleración constante que es relativamente fácil de interpretar.

En las longitudes típicas de registros fiables de mareógrafos (décadas a ~150 años), una función cuadrática a menudo proporciona un ajuste estadísticamente robusto a la no linealidad observada sin sobreajustar. Detectar un crecimiento exponencial verdadero y sostenido a menudo requiere registros más largos y muy estables.

Mientras que los factores subyacentes (como las concentraciones de gases de efecto invernadero, GEI), podrían seguir tendencias casi exponenciales, los complejos sistemas oceánicos y de la criosfera responden con inercia y múltiples procesos que interactúan entre sí. El cambio resultante en el nivel del mar durante los períodos de tiempo observados a menudo se aproxima bien mediante un polinomio que captura la tendencia dominante y la aceleración, en lugar de una función exponencial pura.

Los modelos polinomiales, particularmente los cuadráticos, son el enfoque estándar utilizado en muchos artículos seminales que evalúan la aceleración del nivel del mar a partir de mareógrafos (por ejemplo, los artículos de Douglas y Church y White citados anteriormente). Esto permite una mejor comparabilidad entre estudios. El uso generalizado en la literatura citada sobre el nivel del mar sirve en sí mismo como justificación.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) reconoce explícitamente la aceleración del aumento del nivel del mar. Sus informes de evaluación sintetizan la literatura científica, incluidos los estudios que utilizan ajustes cuadráticos u otros métodos estadísticos para cuantificar esta aceleración. Por ejemplo, el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, Grupo de Trabajo I (WGI) - La Base de la Ciencia Física, específicamente

reasons. Quadratic models are the next step up in complexity from linear models and directly provide a constant acceleration term that is relatively easy to interpret.

Over the typical lengths of reliable tide gauge records (decades to ~150 years), a quadratic function often provides a statistically robust fit to the observed non-linearity without overfitting. Detecting true, sustained exponential growth often requires longer, very stable records.

While underlying drivers (like GHG concentrations) might follow near-exponential trends, the complex ocean and cryosphere systems respond with inertia and multiple interacting processes. The resulting sea level change over observed timescales is often well-approximated by a polynomial capturing the dominant trend and acceleration, rather than a pure exponential function.

Polynomial models, particularly quadratic ones, are the standard approach used in many seminal papers assessing sea level acceleration from tide gauges (e.g., the Douglas and Church and White papers cited above). This allows for better comparability across studies. The widespread use in the cited sea level literature itself serves as justification.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) explicitly acknowledges the acceleration of sea level rise. Their assessment reports synthesize the scientific literature, including studies that use quadratic fits or other statistical methods to quantify this acceleration. For example, the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I (WGI) - The Physical Science Basis, specifically Chapter 9 ("Ocean, cryosphere and sea level change"), states clearly that the rate of global mean sea level (GMSL) rise has accelerated. It notes, "GMSL rise has accelerated since the late 1960s, with an average rate of ... 3.7 [2.8 to 4.6] mm yr⁻¹ over 2006–2018" compared to earlier periods (Summary for Policymakers, A.1.7).

The underlying chapter analyses rely on studies (like those cited above, e.g., Dangendorf *et al.*, 2017) that often use statistical techniques capable of detecting acceleration, consistent with non-linear (including quadratic) trends. While the IPCC's future projections use complex climate models rather than simple extrapolation of quadratic trends, their assessment of historical sea level change confirms acceleration as a key feature, implicitly

el Capítulo 9 (“Océano, criosfera y cambio del nivel del mar”), establece claramente que la tasa de aumento del nivel medio global del mar (GMSL) se ha acelerado. Señala que “la elevación del NMGM se ha acelerado desde finales de la década de 1960, con una tasa media de ... 3,7 [2,8 a 4,6] mm año⁻¹ durante 2006-2018” en comparación con períodos anteriores (Resumen para responsables de políticas, A.1.7).

Los análisis de los capítulos subyacentes se basan en estudios (como los citados anteriormente, por ejemplo, Dangendorf *et al.*, 2017) que a menudo utilizan técnicas estadísticas capaces de detectar aceleración, consistentes con tendencias no lineales (incluidas las cuadráticas). Mientras que las proyecciones futuras del IPCC utilizan modelos climáticos complejos en lugar de una simple extrapolación de tendencias cuadráticas, su evaluación del cambio histórico del nivel del mar confirma la aceleración como una característica clave, respaldando implícitamente el uso de modelos que pueden captarla.

En resumen, el uso de modelos cuadráticos es una práctica estándar y justificada para analizar series temporales del nivel del mar con el fin de capturar la aceleración observada, respaldada por numerosos estudios y reconocida por el IPCC. Mientras que los modelos exponenciales son una alternativa para representar el crecimiento acelerado, los modelos cuadráticos suelen preferirse por su simplicidad, interpretabilidad y buen ajuste empírico durante las escalas temporales de observación típicas en este campo específico.

Generalización de resultados

El modelo propuesto puede aplicarse a muchas otras ubicaciones costeras. Boretti (2024a) presenta una tabla resumen con los valores de v_y , v_z , v_{yz} , y a_y , a_z , a_{yz} para 153 mareógrafos de largo plazo, con una longitud de registro variable entre 81 y 215 años, un promedio de 115 años. Al calcular la tasa de subsidencia en el momento en que comenzaron los registros como el promedio de los valores pasados de los modelos GIA VM2 y VM4 de Peltier, utilizando para la tasa de subsidencia al final del registro los últimos valores de NGL, solo cuando están respaldados por suficientes mediciones y no entran en conflicto con estimaciones anteriores, la estadística resumida para los mareógrafos restantes es la propuesta en la Anexo 1. Este es un trabajo en progreso, ya que las estimaciones de subsidencia

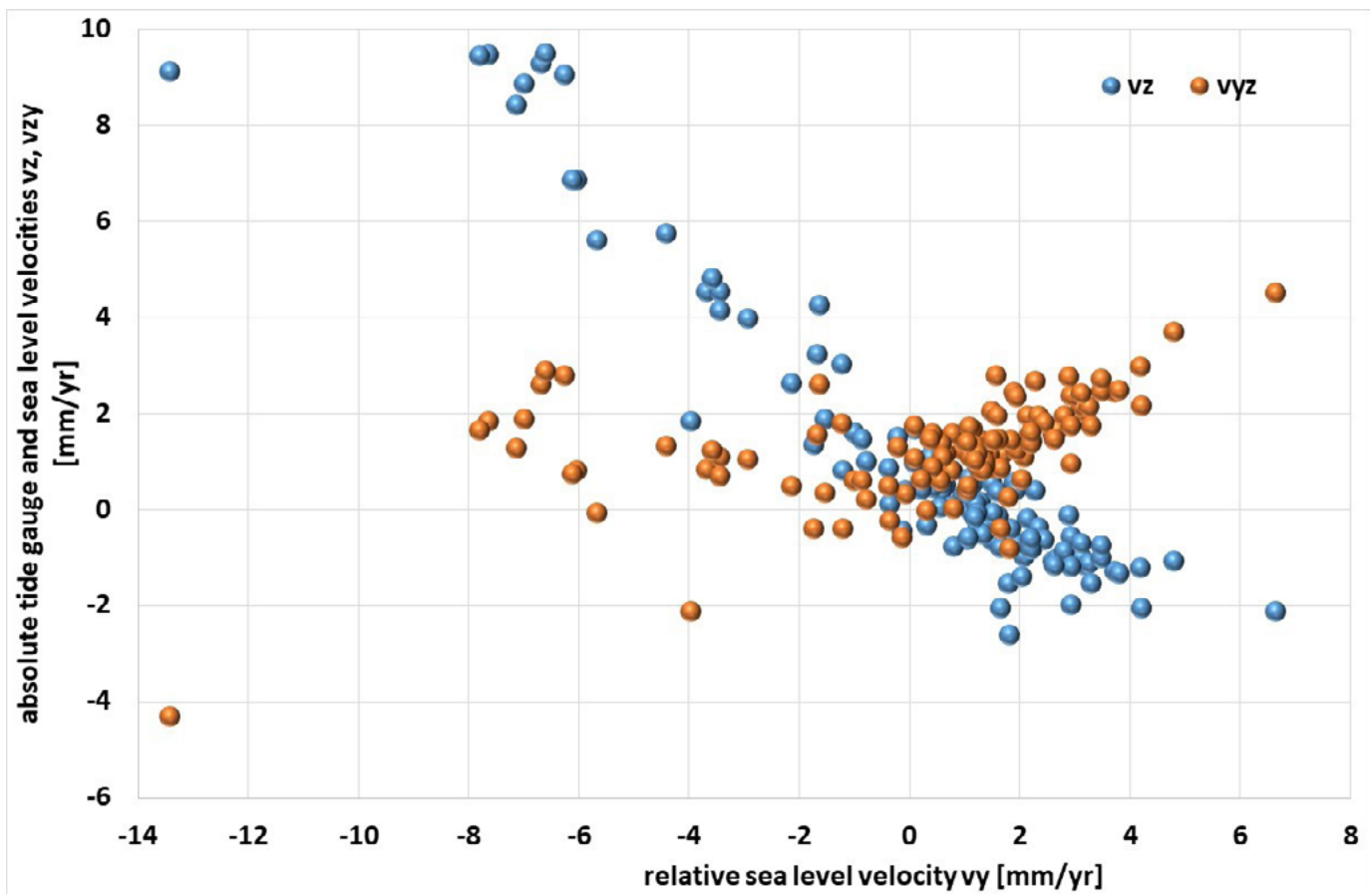
supporting the use of models that can capture it.

In summary, the use of quadratic models is a standard and justified practice for analyzing sea level time series to capture observed acceleration, supported by numerous studies and acknowledged by the IPCC. While exponential models are an alternative for representing accelerating growth, quadratic models are often preferred for their simplicity, interpretability, and good empirical fit over typical observational timescales in this specific field.

Generalization of results

The proposed model can be applied to many other coastal locations. Boretti (2024a) presents a summary table with the values of v_y , v_z , v_{yz} , and a_y , a_z , a_{yz} for 153 long-term tide gauges, having record length variable between 81 and 215 yr, an average of 115 yr. By computing the subsidence rate at the time the records started as the average of Peltier’s GIA VM2 and VM4 models past values, using for the subsidence rate at the end of the record the latest NGL values, only when supported by enough measurements and not conflicting with prior estimations, the summary statistic for the remaining tide gauges is the one proposed in Annex 1. This is a work in progress, as the estimations of subsidence are changing, depending on the availability of more data. Figure 4 presents the v_{yz} , and v_z vs. v_y (a) and a_{yz} and a_z vs. a_y (b) for the long-term, high-quality tide gauges reported in Annex 1. It is immediately noted that higher rates of relative sea level rise are often associated with locations suffering from subsidence, while lower (negative) values of relative sea level rise are often associated with locations experiencing uplift. The rate of rise of the absolute sea levels is mostly in the range of 0 to 2 mm/yr. Opposite, no clear trend is shown for the accelerations, which suffer from inaccuracies much more than the velocities.

están cambiando, dependiendo de la disponibilidad de más datos. La Figura 4 presenta el v_{yz} y v_z vs. v_y (a) y a_{yz} y a_z vs. a_y (b) para los mareógrafos de alta calidad y largo plazo reportados en el Anexo 1. Se observa inmediatamente que las tasas más altas de elevación relativa del nivel del mar a menudo están asociadas con ubicaciones que sufren subsidencia, mientras que los valores más bajos (negativos) de elevación relativa del nivel del mar a menudo están asociados con ubicaciones que experimentan levantamiento. La tasa de aumento de los niveles absolutos del mar se encuentra principalmente en el rango de 0 a 2 mm/año. Por el contrario, no se muestra una tendencia clara para las aceleraciones, que sufren de inexactitudes mucho más que las velocidades.



(a)

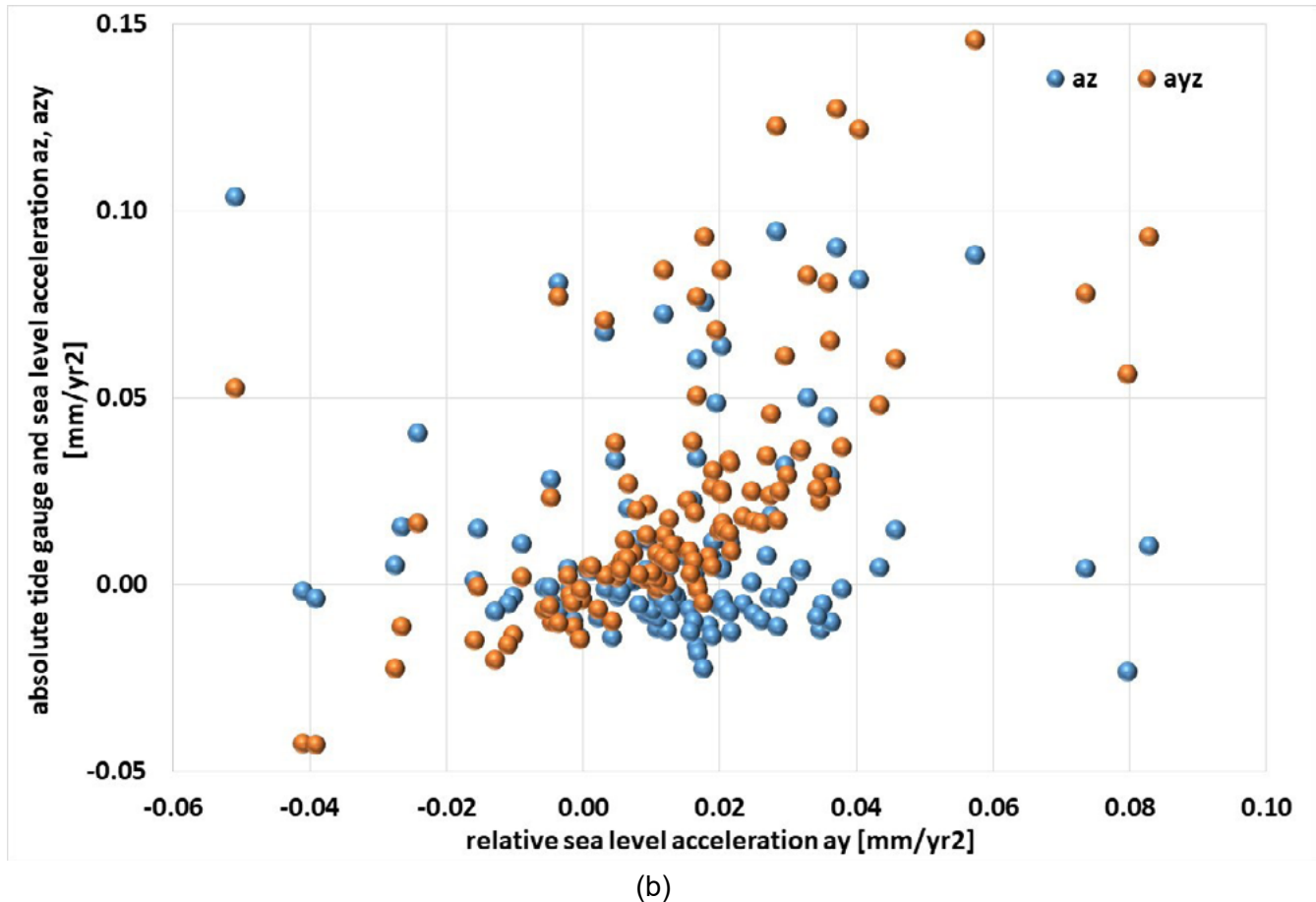


Figura 4. (a) velocidad vertical del mareógrafo (v_z) y velocidad del nivel absoluto del mar (v_{yz}) frente a la velocidad del nivel relativo del mar (v_r). (b) aceleración vertical del mareógrafo (a_z) y aceleración del nivel absoluto del mar (a_{yz}) frente a la aceleración del nivel relativo del mar (a_r). Datos para los mareógrafos de alta calidad y largo plazo reportados en el Anexo 1.

Figure 4. (a) vertical velocity of the tide gauge (v_z) and absolute sea level velocity (v_{yz}) vs. the relative sea level velocity (v_r). (b) vertical acceleration of the tide gauge (a_z) and absolute sea level acceleration (a_{yz}) vs. the relative sea level acceleration (a_r). Data for the long-term, high-quality tide gauges reported in Annex 1.

Fiabilidad de los resultados

La fiabilidad de los resultados propuestos en el Anexo 1 es variable, dependiendo de muchos factores. Por ejemplo, no todos los mareógrafos tienen una cúpula GPS cercana como en Sídney. En algunos casos, las cúpulas GPS están ubicadas muy lejos del mareógrafo, y por lo tanto su posición no es una estimación precisa de la posición del mareógrafo. En el caso de Fremantle, esto no es un problema, ya que el mareógrafo está rodeado por muchas cúpulas GPS con subsidencia similar, pero en otros casos las diferencias pueden ser sustanciales.

Además, las series temporales de GPS suelen ser demasiado cortas y con demasiados puntos de ruptura para proporcionar información fiable. La velocidad GPS de diferentes proveedores para una misma ubicación varía, y a menudo las estimaciones posteriores de los mismos proveedores también son

Reliability of results

The reliability of the results proposed in Annex 1 is variable, depending on many factors. For example, not all the tide gauges have a close-by GPS dome as in Sydney. In some cases, GPS domes are located very far from the tide gauge, and therefore their position is not an accurate estimation of the tide gauge position. In the case of Fremantle, this is not a problem, being the tide gauge surrounded by many GPS domes of similar subsidence, but in other cases differences can be substantial.

Additionally, the GPS time series are often too short and with too many breakpoints to provide reliable information. The GPS velocity by different providers for one same location varies, and often subsequent estimations by the same providers are also significantly different. In the case of The Battery, New York, as proposed by SONEL (2024).

significativamente diferentes. En el caso de The Battery, Nueva York, según lo propuesto por [SONEL \(2024\)](#).

La cúpula GPS de NYBP está sujeta a una tasa de subsidencia de -1,84 mm/año según SONEL ULR7A, -2,25 mm/año según SONEL ULR6B, -2,19 mm/año según NGL 14, -2,08 mm/año según NGL 08, o -3,63 mm/año según GFZ GT3. El NGL 14 actualizado es entonces -2,69 mm/año según [NGL \(2024k\)](#).

Esto demuestra lo difícil que sigue siendo evaluar la velocidad vertical de una cúpula fija en un marco de referencia absoluto. La diferencia en la velocidad de subsidencia para NYBP por diferentes o los mismos proveedores en diferentes momentos, a pesar de estar basada en más de una década de datos, es pequeña en comparación con casos donde el período de datos es mucho menor, por ejemplo, solo un par de años, como desafortunadamente es común en muchas otras ubicaciones. Esta es una fuente importante de inexactitud que requiere un examen caso por caso del resultado del GPS, posiblemente con la ayuda de información adicional como la comparación de los niveles absolutos del mar obtenidos por satélite y el nivel relativo del mar medido por mareógrafos, como se hace en la [Figura 3](#). Este otro enfoque también tiene problemas, ya que los niveles absolutos del mar por satélite no son una medida directa sino más bien una especie de producto computacional, y como tal, no se espera que sean muy precisos.

Las estimaciones del modelo GIA para la subsidencia pasada tampoco se espera que sean muy precisas, y especialmente en áreas sujetas a importantes movimientos corticales, los valores de subsidencia o elevación pueden ser poco realistas. Además, los registros del mareógrafo pueden tener problemas ya que a menudo son registros “segmentados” obtenidos al componer los resultados de múltiples sensores, a veces también ubicados en diferentes lugares, y a veces con un datum no bien documentado. Aunque los datos espurios siempre deben eliminarse, las series temporales con vacíos son difíciles de utilizar para estimaciones fiables de velocidades y aceleraciones del nivel relativo del mar.

Problemas que pasan por alto la subsidencia antropogénica

Aunque el modelo propuesto no siempre es fiable, no obstante indica que existe la necesidad de tener en cuenta la subsidencia antropogénica no menos que el aumento eustático del nivel

The GPS dome of NYBP is subjected to a subsidence rate of -1.84 mm/yr according to SONEL ULR7A, -2.25 mm/yr according to SONEL ULR6B, -2.19 mm/yr according to NGL 14, -2.08 mm/yr according to NGL 08, or -3.63 mm/yr according to GFZ GT3. The updated NGL 14 is then -2.69 mm/yr by [NGL \(2024k\)](#).

This demonstrates how difficult is still to assess the vertical velocity of a fixed dome in an absolute reference frame. The difference in the subsidence velocity for NYBP by different or same providers at different times, despite being based on more than a decade of data, is small when compared to cases where the period of data is much less, for example just a couple of years, as unfortunately is common in many other locations. This is a major source of inaccuracy that necessitates a case-by-case examination of the GPS result, with possibly the help of additional information such as the comparison of absolute sea levels from satellite and relative sea level by tide gauge as done in [Figure 3](#). This other approach also has issues, as the satellite absolute sea levels are not a direct measure but more a sort of computational product, and as such, are not expected to be very accurate.

GIA model estimations for past subsidence are also not expected to be very accurate, and especially in areas subjected to major crustal movements, subsidence or uplift values may be unrealistic. Also, the tide gauge records may have issues as they are often “segmented” records obtained composing the results from multiple sensors, sometimes also located in different locations, and sometimes with a not well-documented datum. While spurious data should always be removed, time series with gaps are difficult to use for reliable estimations of relative sea level velocities and accelerations.

Issues overlooking anthropogenic subsidence

While the proposed model is not always reliable, nevertheless it indicates that there is a need to account for anthropogenic subsidence not less than anthropogenic eustatic sea level rise. It is well accepted that many coastal cities throughout the world are affected by subsidence, as it is also well accepted that this subsidence has anthropogenic origins, having grown considerably since the end of the 1800s, phased with groundwater withdrawal, mining, and loading by infrastructure and buildings, it is time to acknowledge that the sea level velocity and acceleration in tide gauge signals may have a significant contribution by the growing

del mar antropogénico. Es ampliamente aceptado que muchas ciudades costeras en todo el mundo se ven afectadas por la subsidencia, así como también es ampliamente aceptado que esta subsidencia tiene orígenes antropogénicos, habiendo crecido considerablemente desde finales del siglo XIX, en fases con la extracción de aguas subterráneas, la minería y la carga por infraestructura y edificios, es hora de reconocer que la velocidad del nivel del mar y la aceleración en las señales de los mareógrafos pueden tener una contribución significativa debido a la creciente subsidencia. Los resultados anteriores demostraron que las reconstrucciones del nivel medio del mar global basadas en mareógrafos, como la de CSIRO (CSIRO, N.A.), asumen erróneamente la estabilidad de la posición del mareógrafo cuando, por el contrario, la mayoría de las ubicaciones se ven afectadas por una subsidencia creciente, sobrestimando así el efecto eustático.

Explicación de la Oscilación Cuasi-60-Años

El término “oscilación cuasi-60 años” describe fluctuaciones notables en los registros del nivel del mar que ocurren durante varias décadas, típicamente superpuestas a la tendencia a largo plazo del aumento del nivel del mar. La designación “quasi” refleja que estas variaciones no son perfectamente regulares en período o amplitud, diferenciándose de un ciclo sinusoidal estricto. No obstante, esta variabilidad multidecadal es una característica bien documentada en muchos registros de mareógrafos largos a nivel mundial. Su presencia complica el análisis de las tendencias y aceleraciones del nivel del mar, ya que los registros significativamente más cortos que esta escala temporal característica (por ejemplo, menos de 60-80 años) pueden producir resultados sesgados por la fase particular de la oscilación capturada (Chambers *et al.*, 2012).

Esta variabilidad multidecadal se atribuye principalmente a modos naturales de variabilidad climática a gran escala, que involucran procesos acoplados océano-atmósfera en las principales cuencas oceánicas. Hay varios mecanismos clave que mencionar.

La Variabilidad Multidecadal del Atlántico (AMV) / Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) se considera un contribuyente importante. El AMV/AMO representa fluctuaciones en toda la cuenca de las temperaturas de la superficie del mar (SST) del

subsidencia. The above results demonstrated as tide gauge-based reconstructions of global mean sea level such as the CSIRO one (CSIRO, N.A.), which wrongly assume the stability of the tide gauge position when opposite most of the locations are affected by increasing subsidencia, thus overrating the eustatic effect.

Explanation of the Quasi-60-Year Oscillation

The term “quasi-60-year oscillation” describes noticeable fluctuations in sea level records that occur over several decades, typically superimposed on the long-term trend of sea level rise. The designation “quasi” reflects that these variations are not perfectly regular in period or amplitude, differing from a strict sinusoidal cycle. Nonetheless, this multi-decadal variability is a well-documented feature in many long tide gauge records globally. Its presence complicates the analysis of sea level trends and accelerations, as records significantly shorter than this characteristic timescale (e.g., less than 60-80 years) can yield results biased by the particular phase of the oscillation captured (Chambers *et al.*, 2012).

This multi-decadal variability is primarily attributed to natural, large-scale modes of climate variability, which involve coupled ocean-atmosphere processes in major ocean basins. There are several key mechanisms to mention.

The Atlantic Multidecadal Variability (AMV) / Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is considered a major contributor. The AMV/AMO represents basin-wide fluctuations in North Atlantic sea surface temperatures (SSTs) with characteristic timescales often cited between 50 and 80 yr (Schlesinger and Ramankutty, 1994; Enfield *et al.*, 2001). These SST changes influence sea level regionally through Thermosteric Effects and Dynamic Effects. Warmer water during positive phases expands, raising sea level, while cooler water contracts during negative phases. Associated salinity changes (halosteric effects) can also contribute. The AMV/AMO is linked to changes in atmospheric circulation (like the North Atlantic Oscillation) and ocean currents, particularly the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). Variations in AMOC strength and associated wind patterns alter the distribution of water masses and heat, causing dynamic sea level adjustments, especially along the North American and European coastlines (Knight *et al.*, 2005; McCarthy *et al.*, 2015).

Atlántico Norte con escalas temporales características que a menudo se citan entre 50 y 80 años (Schlesinger y Ramankutty, 1994; Enfield *et al.*, 2001). Estos cambios en la TSM influyen en el nivel del mar regionalmente a través de Efectos Termostéricos y Efectos Dinámicos. El agua más cálida durante las fases positivas se expande, elevando el nivel del mar, mientras que el agua más fría se contrae durante las fases negativas. Los cambios de salinidad asociados (efectos halostéricos) también pueden contribuir. El AMV/AMO está vinculado a cambios en la circulación atmosférica (como la Oscilación del Atlántico Norte) y las corrientes oceánicas, particularmente la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC). Las variaciones en la intensidad de la AMOC y los patrones de viento asociados alteran la distribución de las masas de agua y el calor, causando ajustes dinámicos del nivel del mar, especialmente a lo largo de las costas de América del Norte y Europa (Knight *et al.*, 2005; McCarthy *et al.*, 2015).

La Variabilidad Decadal del Pacífico (por ejemplo, la Oscilación Decadal del Pacífico - PDO) también es importante. Los patrones climáticos a gran escala en el Pacífico también contribuyen significativamente a la variabilidad del nivel del mar en escalas multidecadales. La PDO, caracterizada por anomalías de la TSM en el Pacífico Norte, tiene fases dominantes que típicamente duran de 20 a 30 años, pero existe evidencia de una modulación de frecuencia más baja cercana al rango de 50-70 años (Mantua *et al.*, 1997). Al igual que en el Atlántico, las fases de la PDO influyen en el nivel del mar a través de Efectos Termostéricos y Efectos Dinámicos. Los cambios en la TSM del Pacífico conducen a la expansión o contracción regional de la columna de agua. El PDO afecta el estrés del viento (por ejemplo, a través de la Baja de las Aleutianas), influyendo en la circulación del giro oceánico y en el afloramiento/hundimiento costero, causando así cambios dinámicos en el nivel del mar, particularmente notables a lo largo de la costa oeste de América del Norte (Mantua *et al.*, 1997).

Estos modos climáticos a gran escala interactúan y su influencia combinada crea patrones complejos de variabilidad del nivel del mar a nivel mundial. Mientras que el impacto es a menudo más fuerte a nivel regional, estas oscilaciones naturales contribuyen con ruido y patrones cíclicos al registro del nivel medio global del mar, haciendo que la detección de la aceleración a largo plazo sea más difícil, particularmente con períodos de datos limitados (Chambers *et al.*, 2012). La evaluación precisa de las tendencias

The Pacific Decadal Variability (e.g., Pacific Decadal Oscillation - PDO) is also important. Large-scale climate patterns in the Pacific also contribute significantly to multi-decadal sea level variability. The PDO, characterized by SST anomalies in the North Pacific, has dominant phases typically lasting 20-30 yr, but evidence exists for lower-frequency modulation closer to the 50-70 yr range (Mantua *et al.*, 1997). Similar to the Atlantic, PDO phases influence sea level through Thermosteric Effects and Dynamic Effects. Changes in Pacific SST lead to regional expansion or contraction of the water column. The PDO affects wind stress (e.g., via the Aleutian Low), influencing ocean gyre circulation and coastal upwelling/downwelling, thereby causing dynamic sea level changes, particularly noticeable along the North American west coast (Mantua *et al.*, 1997).

These large-scale climate modes interact and their combined influence creates complex patterns of sea level variability globally. While the impact is often strongest regionally, these natural oscillations contribute noise and cyclical patterns to the global mean sea level record, making the detection of long-term acceleration more challenging, particularly with limited data spans (Chambers *et al.*, 2012). Accurately assessing anthropogenic sea level trends requires accounting for or averaging over these natural multi-decadal cycles.

Conclusions

GPS is as a transformative tool for geophysical research. For subsidence velocity computation, GPS data offer unmatched accuracy, spatial coverage, and temporal resolution, making it indispensable for understanding the land contribution to relative sea level rise. By harnessing GPS networks, researchers can better isolate climate-driven sea level changes, improve the calibration of tide gauge records, and enhance the reliability of long-term sea level rise predictions. This integration is particularly critical for coastal planning, infrastructure development, and formulating adaptive strategies to address the combined effects of subsidence and climate change.

This study demonstrates that the velocity and acceleration of relative sea levels measured by tide gauges are significantly influenced by both eustatic effects and subsidence of the tide gauge instruments. The results indicate that subsidence, largely anthropogenic in origin, has been increasing since the late

del nivel del mar antropogénicas requiere tener en cuenta o promediar estos ciclos naturales multidecenales.

Conclusiones

El GPS es una herramienta transformadora para la investigación geofísica. Para el cálculo de la velocidad de subsidencia, los datos GPS ofrecen una precisión, cobertura espacial y resolución temporal inigualables, lo que los hace indispensables para comprender la contribución terrestre al aumento relativo del nivel del mar. Al aprovechar las redes GPS, los investigadores pueden aislar mejor los cambios del nivel del mar impulsados por el clima, mejorar la calibración de los registros de mareógrafos y aumentar la fiabilidad de las predicciones de la subida del nivel del mar a largo plazo. Esta integración es particularmente crítica para la planificación costera, el desarrollo de infraestructura y la formulación de estrategias adaptativas para abordar los efectos combinados de la subsidencia y el cambio climático.

Este estudio demuestra que la velocidad y aceleración de los niveles relativos del mar medidos por los mareógrafos están significativamente influenciados tanto por efectos eustáticos como por el hundimiento de los instrumentos mareográficos. Los resultados indican que la subsidencia, en gran parte de origen antropogénico, ha ido aumentando desde finales del siglo XIX y debe ser considerada en las evaluaciones del aumento del nivel del mar. Al aplicar el modelo a los datos del mareógrafo, el estudio destaca la necesidad de integrar datos de subsidencia, derivados tanto de modelos históricos de GIA como de mediciones recientes de GPS, en los análisis de las tendencias del nivel del mar. En Sídney, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad despreciable, $v_{yz}=+0,02$ mm/año, sometidos a una pequeña aceleración positiva $a_{yz}=+0,0083$ mm/año². De manera similar, en Fremantle, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad insignificante, $v_{yz}=+1.72-1.56=+0.16$ mm/año, sometido a una pequeña aceleración negativa, $a_{yz}=-0,0103$ mm/año². La lista resumida que considera los niveles del mar relativos y absolutos, teniendo en cuenta la subsidencia variable en 153 ubicaciones de mareógrafos a largo plazo, muestra que la tasa de aumento de los niveles absolutos del mar se encuentra principalmente en el rango de 0 a 2 mm/año. Por el contrario, no se muestra una tendencia clara para las aceleraciones, que sufren de inexactitudes mucho más que las velocidades.

1800s and must be considered in sea level rise assessments. By applying the model to tide gauge data, the study highlights the necessity of integrating subsidence data, derived from both historical GIA models and recent GPS measurements, into analyses of sea level trends. In Sydney, the absolute sea levels have grown at a negligible velocity, $v_{yz}=+0.02$ mm/yr, subjected to a small positive acceleration $a_{yz}=+0.0083$ mm/yr². Similarly, in Fremantle, the absolute sea levels have grown at a negligible velocity, $v_{yz}=+1.72-1.56=+0.16$ mm/yr, subjected to a small negative acceleration, $a_{yz}=-0.0103$ mm/yr². The summary list considering relative and absolute sea levels accounting for variable subsidence in 153 long-term tide gauges location shows the rate of rise of the absolute sea levels is mostly in the range of 0 to 2 mm/yr. Opposite, no clear trend is shown for the accelerations, which suffer from inaccuracies much more than the velocities.

The approach proposed in this work provides a more accurate understanding of sea level dynamics and underscores the critical need to address subsidence in coastal management and climate change mitigation strategies.

El enfoque propuesto en este trabajo proporciona una comprensión más precisa de la dinámica del nivel del mar y subraya la necesidad crítica de abordar la subsidencia en la gestión costera y las estrategias de mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D. and Gamal, M. (2007). Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys. *GPS Solutions*, 12(1), pp. 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0061-0>.
- Antonov, J.I., Levitus, S. and Boyer, T.P. (2005). Thermosteric sea level rise, 1955–2003. *Geophysical Research Letters*, 32(12), L12602. <https://doi.org/10.1029/2005GL023112>.
- Baldi, P., Casula, G., Cenni, N., Loddo, F. and Pesci, A. (2009). GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1–2), pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.023>.
- Bell, J.W., Amelung, F., Ramelli, A.R. and Blewitt, G. (2002). Land subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935–2000: New geodetic data show evolution, revised spatial patterns, and reduced rates. *Environmental & Engineering Geoscience*, 8(3), pp. 155–174. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.8.3.155>.
- Blewitt, G. and Hammond, W. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Blewitt, G., Hammond, W.C., Kreemer, C., Plag, H.P., Stein, S. and Okal, E. (2009). GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems. *Journal of Geodesy*, 83(3–4), pp. 335–343. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0260-6>.
- Blewitt, G., Altamimi, Z., Davis, J., Gross, R., Kuo, C.Y., Lemoine, F.G., Moore, A.W., Neilan, R.E., Plag, H.P., Rothacher, M. and Shum, C.K. (2010). Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea-level rise and variability. In: *Understanding Sea-Level Rise and Variability*. Wilson (eds.), Oxford: Blackwell Publishing Ltd., pp. 256–284. <https://doi.org/10.1002/9781444323283.ch9>.
- Bock, Y., Melgar, D. and Crowell, B.W. (2011). Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), pp. 2904–2925. <https://doi.org/10.1785/0120110007>.
- Bock, Y., Wdowinski, S., Ferretti, A., Novali, F. and Fumagalli, A. (2012). Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3), Q03023. <https://doi.org/10.1029/2011GC003976>.
- Boretti, A. (2012). *Is there any support in the long term tide gauge data to the claims that parts of Sydney will be swamped by rising sea levels?* *Coastal Engineering*, 64, pp. 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.01.006>.
- Boretti, A. (2022a). A revised procedure to analyze the time series of monthly average mean sea levels corrected for non-linear subsidence. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(22), p 1667. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10847-8>.
- Boretti, A. (2022b). A revised procedure to compute future land losses in the delta of the Mekong River. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(17), 1440. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10683-8>.
- Boretti, A. (2024a). Absolute sea levels at tide gauge locations accounting to variable subsidence. In: *Nonlinear Approaches in Engineering Application*. R.N. Jazar and L. Dai (eds.), Cham: Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53712-7_10.
- Boretti, A. (2024b). Accelerating subsidence in the analysis of tide gauge records. In: *Nonlinear Approaches in Engineering Application*. R.N. Jazar and L. Dai (eds.), Nonlinear Approaches in Engineering Application. Cham: Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53712-7_11.
- Boretti, A. (2024c). *Relative sea level and subsidence in Sydney (Version 1)*. Sidney. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/4gy2dmvk2y.1>.
- Burbey, T.J., Warner, S.M., Blewitt, G., Bell, J.W. and Hill, E. (2006). Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, part 1: Analysis of field data. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), pp. 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.028>.
- Chambers, D.P., Merrifield, M.A. and Nerem, R.S. (2012). Is there a 60-year oscillation in global mean sea level? *Geophysical Research Letters*, 39(18), L18607. <https://doi.org/10.1029/2012GL052885>.
- Chang, C., Mallman, E. and Zoback, M. (2014). Time-dependent subsidence associated with drainage-induced compaction in Gulf of Mexico shales bounding a severely depleted gas reservoir. *AAPG Bulletin*, 98(6), pp. 1145–1159. <https://doi.org/10.1306/11111313020>.
- CSIRO (n.d.). Sea level data. Available at: https://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html (Accessed: 27 May 2025).
- Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C.P., Frederikse, T. and Riva, R. (2017). Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(23), pp. 5946–5951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616007114>.
- Douglas, B.C. (1995). Global sea level change: Determination and interpretation. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), pp. 1425–1432. <https://doi.org/10.1029/95RG00379>.
- Douglas, B.C. (1997). Global sea rise: A redetermination. *Surveys in Geophysics*, 18(2–3), pp. 279–292. <https://doi.org/10.1023/A:1006544227856>.
- Emery, K.O. and Aubrey, D.G. (1989). Tide gauges of India. *Journal of Coastal Research*, 5(3), pp. 489–501. Available at: <https://www.jstor.org/stable/4297556> (Accessed: 27 May 2025).
- Emery, K.O. and Aubrey, D.G. (2012). *Sea Levels, Land Levels, and Tide Gauges*. New York: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8081-6>.

- Erban, L.E., Gorelick, S.M. and Zebker, H.A. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084010>.
- Featherstone, W., Filmer, M., Penna, N., Morgan, L. and Schenk, A. (2012). Anthropogenic land subsidence in the Perth Basin: Challenges for its retrospective geodetic detection. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 95(1), pp. 53–62.
- Garthwaite, M.C. and Fuhrmann, T. (2020). *Subsidence monitoring in the Sydney Basin, New South Wales: Results of the Camden Environmental Monitoring Project*. Geoscience Australia. Available at: https://d28rz98at-9flks.cloudfront.net/144247/144247_00_1.pdf (Accessed: 27 May 2025).
- Hammond, W.C., Burgette, R.J., Johnson, K.M. and Blewitt, G. (2018). Uplift of the western transverse ranges and Ventura area of Southern California: A four-technique geodetic study combining GPS, InSAR, leveling, and tide gauges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), pp. 836–858. <https://doi.org/10.1002/2017JB014499>.
- Harvey, T.C., Hamlington, B.D., Frederikse, T., Nerem, R.S., Piecuch, C.G., Hammond, W.C., Blewitt, G., Thompson, P.R., Bekaert, D.P.S., Landerer, F.W. and Reager, J.T. (2021). Ocean mass, steric dynamic effects, and vertical land motion largely explain US coast relative sea level rise. *Communications Earth & Environment*, 2(1), p. 233. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00310-8>.
- Higgins, S.A. (2016). Advances in delta-subsidence research using satellite methods. *Hydrogeology Journal*, 24(3), pp. 587–600. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1330-7>.
- Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S. and Pugh, J. (2013). New data systems and products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29(3), pp. 493–504. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1>.
- Karegar, M.A., Dixon, T.H. and Engelhart, S.E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), pp. 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>.
- Khan, S.D., Huang, Z. and Karacay, A. (2014). Study of ground subsidence in northwest Harris county using GPS, LiDAR, and InSAR techniques. *Natural Hazards*, 73(3), pp. 1143–1173. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1125-7>.
- Kolker, A.S., Allison, M.A. and Hameed, S. (2011). An evaluation of subsidence rates and sea-level variability in the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 38(21), L21404. <https://doi.org/10.1029/2011GL049458>.
- Marcos, M. and Amores, A. (2014). Quantifying anthropogenic and natural contributions to thermosteric sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 41(7), pp. 2502–2507. <https://doi.org/10.1002/2014GL059766>.
- Minderhoud, P.S., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H. and Stouthamer, E. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7146>.
- Minderhoud, P.S.J., Coumou, L., Erban, L.E., Middelkoop, H., Stouthamer, E. and Addink, E.A. (2018). The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. *Science of the Total Environment*, 634, pp. 715–726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.372>.
- Mörner, N.A. (1979). The northwest European “sea-level laboratory” and regional Holocene eustasy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 29, pp. 281–300. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(79\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0031-0182(79)90086-5).
- Mörner, N.A. (2004). Estimating future sea level changes from past records. *Global and Planetary Change*, 40(1-2), pp. 49–54. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00097-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00097-3).
- Mörner, N.A. (2010a). Sea level changes in Bangladesh new observational facts. *Energy & Environment*, 21(3), pp. 235–249. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.21.3.235>.
- Mörner, N.A. (2010b). Some problems in the reconstruction of mean sea level and its changes with time. *Quaternary International*, 221(1-2), pp. 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.10.030>.
- Mörner, N.A. (2013). Sea level changes past records and future expectations. *Energy & Environment*, 24(3-4), pp. 509–536. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.24.3-4.509>.
- Mörner, N.A. (2017). Coastal morphology and sea-level changes in Goa, India during the last 500 years. *Journal of Coastal Research*, 33(2), pp. 421–434. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00015.1>.
- Parker, A. (2013a). Sea level trends at locations of the United States with more than 100 years of recording. *Natural Hazards*, 65(1), pp. 1011–1021. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0400-8>.
- Parker, A. (2013b). Oscillations of sea level rise along the Atlantic coast of North America north of Cape Hatteras. *Natural Hazards*, 65(1), pp. 991–997. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0357-7>.
- Parker, A. (2014). Minimum 60 years of recording are needed to compute the sea level rate of rise in the Western South Pacific. *Nonlinear Engineering*, 3(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0001>.
- Parker, A. and Ollier, C.D. (2016). Coastal planning should be based on proven sea level data. *Ocean & Coastal Management*, 124, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.005>.
- Parker, A. and Ollier, C.D. (2017). California sea level rise: Evidence based forecasts vs. model predictions. *Ocean & Coastal Management*, 149, pp. 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.10.013>.
- Parker, A., Saleem, M.S. and Lawson, M. (2013). Sea-level trend analysis for coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 73, pp. 63–81. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.12.005>.
- Parker, A.L., Filmer, M.S. and Featherstone, W.E. (2017). First results from Sentinel-1A InSAR over Australia: Application to the Perth Basin. *Remote Sensing*, 9(3), p. 299. <https://doi.org/10.3390/rs9030299>.
- Parker, A., Mörner, N.A. and Matlack-Klein, P. (2018). Sea level acceleration caused by earthquake induced subsidence in the Samoa Islands. *Ocean & Coastal Management*, 161, pp. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.017>.
- Peltier, W.R. (1999). Global sea level rise and glacial isostatic adjustment. *Global and Planetary Change*, 20(2-3), pp. 93–123. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00064-2).
- Peltier, W.R. (2004). Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, pp. 111–149. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>.
- Peltier, W.R. and Andrews, J.T. (1976). Glacial-isostatic adjustment, I. The

- forward problem. *Geophysical Journal International*, 46(3), pp. 605–646. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01251.x>.
- Rateb, A. and Abotalib, A.Z. (2020). Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019. *Science of the Total Environment*, 729, 138868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138868>.
- Schlesinger, M.E. and Ramankutty, N. (1994). An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367(6465), pp. 723–726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>.
- Tregoning, P. and Watson, C. (2009). Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B9), B09403. <https://doi.org/10.1029/2009JB006344>.
- Wang, G. and Soler, T. (2015). Measuring land subsidence using GPS: Ellipsoid height versus orthometric height. *Journal of Surveying Engineering*, 141(2), 05014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000137).
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54(1), pp. 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>.
- Wöppelmann, G., Miguez, B.M., Bouin, M.N. and Altamimi, Z. (2007). Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change*, 57(3–4), pp. 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.002>.
- Wöppelmann, G., Testut, L. and Créach, R. (2011). La montée du niveau des océans par marégraphie et géodésie spatiale: Contributions françaises à une problématique mondiale. *Annales Hydrographiques*, 6eme Ser., 8(777), pp. 11–14. Available at: https://refmar.shom.fr/sites/default/files/2024-02/Woppelmann_etal_2011.pdf (Accessed: 27 May 2025).
- Wu, P.C., Wei, M. and D'Hondt, S. (2022). Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR. *Geophysical Research Letters*, 49(7), e2022GL098477. <https://doi.org/10.1029/2022GL098477>.
- Zervas, C., Gill, S. and Sweet, W. (2013). Estimating vertical land motion from long-term tide gauge records. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 065. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/26077> (Accessed: 27 May 2025).



Annex 1 - Values of v_y , v_z , v_{yz} and a_y , a_z , a_{yz} for long-term tide gauges. This is a revised version of Table 1 in Boretti (2024a) obtained improving subsidence estimations and updating tide gauge data, with also removal of lower quality results. / Valores de v_y , v_z , v_{yz} y a_y , a_z , a_{yz} para mareógrafos a largo plazo. Esta es una versión revisada de la Tabla 1 en Boretti (2024a) obtenida mejorando las estimaciones de subsidencia y actualizando los datos de los mareógrafos, con la eliminación también de resultados de menor calidad.

Annex 1 - Values of v_y , v_z , v_{yz} and a_y , a_z , a_{yz} for long-term tide gauges. This is a revised version of Table 1 in Boretti (2024a) obtained improving subsidence estimations and updating tide gauge data, with also removal of lower quality results. / Valores de v_y , v_z , v_{yz} y a_y , a_z , a_{yz} para mareógrafos a largo plazo. Esta es una versión revisada de la Tabla 1 en Boretti (2024a) obtenida mejorando las estimaciones de subsidencia y actualizando los datos de los mareógrafos, con la eliminación también de resultados de menor calidad.

Station	sealevel.info						Peltier	Peltier	Velocidad vertical NGL	Domo GPS NGL	Este modelo			
	t_c	t_e	$(t_e - t_c)$	v_y	a_y	$v_{y,s}$					v_z	a_z	b_{yz}	ayz
			years	mm/yr	mm/yr ²	mm/yr					mm/yr	mm/yr ²	mm/yr	mm/yr ²
Brest, France	1807.04	2022.46	215.42	1.04	0.0134	-0.31	-0.18	-0.25	-1.02	BRST	-0.63	-0.0029	0.41	0.0105
Swinoujscie, Poland	1811.04	2021.38	210.34	0.95	0.0119	0.37	0.01	0.19	0.35	SWIN	0.27	0.0013	1.22	0.0132
Maassluis, Netherlands	1848.04	2022.96	174.92	1.69	0.0051	-0.05	-0.02	-0.04	-1.05	DLFT	-0.54	-0.0031	1.15	0.0020
Cuxhaven 2, Germany	1843.04	2022.96	179.92	2.13	-0.0020	-0.35	-0.57	-0.46	0.09	TGCU	-0.19	-0.0010	1.95	-0.0030
Wismar 2, Germany	1848.54	2021.79	173.25	1.44	0.0047	0.05	-0.24	-0.10	-0.54	D779	-0.32	-0.0018	1.13	0.0028
San Francisco, CA, USA	1854.54	2023.96	169.42	1.51	0.0137	-0.68	-0.05	-0.37	-0.93	UCSF	-0.65	-0.0038	0.86	0.0098
The Battery, NY, USA	1856.04	2023.96	167.92	2.93	0.0108	-1.67	-0.87	-1.27	-2.69	NYBP	-1.98	-0.0118	0.95	-0.0010
Warnemunde 2, Germany	1855.29	2022.79	167.50	1.29	0.0074	0.12	-0.24	-0.06	0.36	WARN	0.15	0.0009	1.44	0.0083
Vlissingen, Netherlands	1862.04	2022.96	160.92	1.49	0.0298	0.04	0.09	0.07	-0.25	VLIS	-0.09	-0.0006	1.40	0.0292
Aberdeen I, UK	1862.04	2022.96	160.92	0.77	0.0126	0.85	0.77	0.81	0.79	ABER	0.80	0.0050	1.57	0.0176
Hoek Van Holland, Netherlands	1864.04	2022.96	158.92	2.41	-0.0002	-0.06	-0.04	-0.05	-1.15	HHOL	-0.60	-0.0038	1.81	-0.0040
Delfzijl, Netherlands	1865.04	2022.96	157.92	1.81	0.0166	-0.37	-0.5	-0.44	-4.81	DZYL	-2.62	-0.0166	-0.81	0.0000
Ijmuiden, Netherlands	1871.37	2022.96	151.59	1.66	0.0234	-0.18	-0.19	-0.19	-1.42	IJMU	-0.80	-0.0053	0.85	0.0181
Oscarsborg, Norway	1872.12	2022.96	150.84	-1.64	-0.0048	4.18	2.99	3.59	4.92	OSLS	4.25	0.0282	2.61	0.0234

Trieste, Italy	1875.04	2021.96	146.92	1.32	0.0046	0.21	0.34	0.28	-0.57	TRIE	-0.15	-0.0010	1.18	0.0035
Helsinki, Finland	1879.04	2022.96	143.92	-2.15	0.0275	2.31	0.55	1.43	3.82	SG02, SG40, METS	2.63	0.0183	0.48	0.0458
Bergen, Norway	1883.04	2022.96	139.92	0.08	0.0214	1.47	0.68	1.08	2.26	BERH	1.67	0.0119	1.75	0.0333
Vaasa / Vasa, Finland	1883.71	2022.96	139.25	-7.14	0.0166	8.86	6.51	7.69	9.16	VAA2, VAAS	8.42	0.0605	1.29	0.0771
Marseille, France	1885.12	2023.21	138.09	1.31	-0.0017	-0.02	0.07	0.03	-0.91	MARS	-0.44	-0.0032	0.87	-0.0049
Sydney, Fort Denison 2, Australia	1886.96	2022.96	136.00	0.80	0.0200	0.12	0.03	0.08	-1.62	FTDN	-0.77	-0.0057	0.03	0.0143
Olands Norra Udde, Sweden	1887.04	2022.96	135.92	-1.01	0.0094	1.51	0.29	0.90	2.30	OBOD	1.60	0.0118	0.59	0.0212
Kungsholmsfort, Sweden	1887.04	2022.96		135.92	0.10	0.7	-0.16	0.27	1.67	KUN0	0.97	0.0071	1.07	0.0224
Stockholm, Sweden	1889.04	2022.96		133.92	-3.69	4.13	2.39	3.26	5.81	OKTH, OHDG	4.54	0.0339	0.84	0.0506
Liverpool Georges and Princes Piers, UK	1858.04	1983.96		125.92	1.14	0.29	0.36	0.33	0.75	LIVE	0.54	0.0043	1.68	0.0245
Oulu / Uleaborg, Finland	1889.04	2022.96		133.92	-6.26	10.25	8.01	9.13	8.97	OUL2, OULU	9.05	0.0676	2.79	0.0707
Aarhus, Denmark	1888.71	2017.96		129.25	0.65	0.13	-0.51	-0.19	1.22	SKEJ, TA01	0.51	0.0040	1.16	0.0133
Esbjerg, Denmark	1889.04	2017.96		128.92	1.25	-0.52	-0.97	-0.75	0.07	ESBC	-0.34	-0.0026	0.91	0.0082
Kobenhavn, Den- mark	1889.04	2017.96		128.92	0.58	0.34	-0.31	0.02	0.71	BUDD, BUDP	0.36	0.0028	0.94	0.0192
Ratan, Sweden	1892.04	2022.96		130.92	-7.65	9.49	7.16	8.33	10.61	RAT0	9.47	0.0723	1.82	0.0841
Fredericia, Denmark	1889.62	2017.96		128.34	1.10	-0.2	-0.72	-0.46	0.42	SMID	-0.02	-0.0001	1.09	0.0053
North Shields, UK	1895.04	2022.29		127.25	1.89	0.38	0.36	0.37	0.74	NSTG	0.56	0.0044	2.45	0.0022
Hirtshals, Denmark	1892.04	2017.96		125.92	-0.22	1.43	0.54	0.99	2.04	HIRS	1.51	0.0120	1.29	0.0199
Gedser, Denmark	1892.04	2017.96		125.92	1.20	0.09	-0.33	-0.12	0.36	GESR	0.12	0.0010	1.32	0.0067
Saint John, N.B., Canada	1896.46	2021.96		125.50	2.14	-0.74	-0.47	-0.61	-0.72	SIPA	-0.66	-0.0053	1.48	-0.0099
Fremantle, Australia	1897.04	2022.96		125.92	1.80	0.06	-0.01	0.03	-3.13		-1.55	-0.0123	0.24	-0.0001
Landsort, Sweden	1887.04	2006.63		119.59	-2.94	3.24	1.63	2.44	5.51	ONVN	3.97	0.0332	1.04	0.0380
Halifax, Canada	1895.87	2014.54		118.67	3.19	-1.25	-0.7	-0.98	-1.37	HLFX	-1.17	-0.0099	2.01	-0.0113
Seattle, WA, USA	1899.04	2023.96		124.92	2.08	-1.28	-0.46	-0.87	-1.10	SEAT	-0.99	-0.0079	1.10	0.0014
Philadelphia, PA, USA	1900.54	2023.96		123.42	3.11	-1.51	-0.66	-1.09	-0.87	PAPH	-0.98	-0.0079	2.13	0.0171
Dunedin II, New Zealand	1900.04	2016.96		116.92	1.37	0.33	0.26	0.30	-1.24	DUND, DUNT	-0.47	-0.0040	0.90	0.0164
Baltimore, MD, USA	1902.46	2023.96		121.50	3.26	-1.22	-0.35	-0.79	-1.47	SA15	-1.13	-0.0093	2.13	0.0016

Genova, Italy	1884.04	2021.96	137.92	1.28		0.13	0.24	0.19	-0.48	GENO	-0.15	-0.0011	1.13	0.0022
Klaipeda, Lithuania	1898.04	2018.96	120.92	1.49		0.57	-0.17	0.20	0.91	KLPD	0.56	0.0046	2.05	0.0480
Cascais, Portugal	1882.04	1993.96	111.92	1.27		0.01	-0.03	-0.01	-0.57	CASC	-0.29	-0.0026	0.98	0.0105
Honolulu, HI, USA	1905.04	2023.96	118.92	1.53		0.29	0.16	0.23	-0.48	HNLC	-0.13	-0.0011	1.41	-0.0014
San Diego, CA, USA	1906.04	2023.96	117.92	2.21		-0.44	-0.1	-0.27	-1.35	P475	-0.81	-0.0069	1.40	0.0031
Galveston Pier 21, TX, USA	1908.37	2023.96	115.59	6.64		-0.61	-0.19	-0.40	-3.84	TXGA	-2.12	-0.0183	4.52	-0.0015
Balboa, Panama	1908.04	2020.96	112.92	1.37		0.18	0.05	0.12	-0.86	IGN1	-0.37	-0.0033	1.00	-0.0136
Prince Rupert, Canada	1909.04	2021.96	112.92	1.09		0.46	0.84	0.65	0.63	BCPT	0.64	0.0057	1.73	0.0118
Victoria, Canada	1909.2	2021.96	112.76	0.75		-1	-0.23	-0.62	0.74	ALBH	0.06	0.0006	0.81	0.0069
Tofino, Canada	1909.79	2021.96	112.17	-1.22		-1.04	-0.27	-0.66	2.29	TFNO	0.82	0.0073	-0.40	0.0262
Vancouver, Canada	1909.87	2021.96	112.09	0.55		-0.11	0.53	0.21	-0.11	BCVC	0.05	0.0004	0.60	0.0251
Atlantic City, NJ, USA	1911.71	2023.96	112.25	4.19		-1.67	-0.72	-1.20	-1.24	NJGT	-1.22	-0.0108	2.97	0.0075
Smogen, Sweden	1911.04	2022.96	111.92	-1.68		2.81	1.72	2.27	4.21	SMOO	3.24	0.0289	1.56	0.0651
Portland, ME, USA	1912.04	2023.96	111.92	1.94		-0.49	-0.13	-0.31	1.14	MEEL	0.42	0.0037	2.36	0.0045
Charlottetown, Canada	1911.29	2021.96	110.67	3.28		-2.25	-1.98	-2.12	-0.99	PETI	-1.55	-0.0140	1.73	-0.0098
Mantyluoto, Finland	1910.62	2022.96	112.34	-5.68		6.75	4.53	5.64	5.59	OLKI	5.62	0.0500	-0.06	0.0829
Aberdeen II, UK	1862.04	1965.96	103.92	0.58		0.85	0.77	0.81	0.79	ABER	0.80	0.0077	1.38	0.0346
Key West, FL, USA	1913.04	2023.96	110.92	2.61		-0.36	-0.16	-0.26	-1.87	CHIN	-1.07	-0.0096	1.55	0.0164
Cedar Key, FL, USA	1914.29	2023.96	109.67	2.33		-0.54	-0.08	-0.31	-0.44	FLCK	-0.38	-0.0034	1.96	0.0240
Nedre Södertälje, Sweden	1869.04	1970.96	101.92	-3.44		4.03	2.34	3.19	5.09	OSDE	4.14	0.0406	0.70	0.0164
Newlyn, UK	1915.37	2022.96	107.59	1.93		-0.35	-0.2	-0.28	-1.15	NEWL	-0.71	-0.0066	1.22	0.0089
Pietarsaari / Jakobstad, Finland	1914.46	2022.96	108.50	-6.99		9.44	7.08	8.26	9.47	VAAS, PYHA	8.87	0.0817	1.87	0.1220
Furuoggrund, Sweden	1916.04	2022.96	106.92	-7.80		9.74	7.48	8.61	10.28	SKE8, SKEO	9.45	0.0883	1.64	0.1456
Bluff (Southland Harbour), New Zealand	1917.71	2022.79	105.08	1.83		0.26	0.2	0.23	-1.02	BLUF	-0.40	-0.0038	1.43	0.0250
Tuapse, Russia	1917.04	2022.96	105.92	2.29		0.11	0.23	0.17	0.60	TUAP	0.39	0.00	2.67	0.00
Ketchikan, AK, USA	1919.04	2023.96	104.92	-0.36		0.13	0.5	0.32	-0.09	AK56	0.11	0.0011	-0.25	-0.0148
Lewes, DE, USA	1919.12	2023.96	104.84	3.71		-1.47	-0.5	-0.99	-1.57	DELW, CHL1	-1.28	-0.0122	2.44	0.0225
Stavanger, Norway	1919.04	2022.96	103.92	0.42		1.24	0.49	0.87	1.43	STAS	1.15	0.0110	1.57	0.0325
Auckland II, New Zealand	1903.87	2000.38	96.51	1.29		0.38	0.29	0.34	-1.31	AUKT	-0.49	-0.0051	0.80	-0.0162
Boston, MA, USA	1921.04	2023.96	102.92	2.93		-1.35	-0.75	-1.05	-0.08	MAMI	-0.57	-0.0055	2.37	0.0026

Charleston, SC, USA	1921.79	2023.96	102.17	3.48	-0.82	-0.09	-0.46	-1.56	SCCC	-1.01	-0.0099	2.47	0.0063
West-Terschelling, Netherlands	1921.04	2022.96	101.92	1.33	-0.45	-0.54	-0.50	-0.55	TERS	-0.52	-0.0051	0.80	0.0299
Kemi, Finland	1920.04	2022.96	102.92	-6.69	10.49	8.28	9.39	9.20	OHAP	9.29	0.0903	2.60	0.1274
Ystad, Sweden	1887.04	1981.96	94.92	0.59	0.41	-0.24	0.09	0.92	OYST	0.50	0.0053	1.09	-0.0223
Varberg, Sweden	1887.04	1981.96	94.92	-0.87	1.3	0.38	0.84	2.10	OVAR	1.47	0.0155	0.60	-0.0111
Pensacola, FL, USA	1923.37	2023.96	100.59	2.69	-0.72	-0.18	-0.45	-1.60	PCIA	-1.03	-0.0102	1.67	0.0261
Port Lyttelton, New Zealand	1923.04	2022.96	99.92	2.81	0.37	0.28	0.33	-2.06	LYTT, MQZG	-0.87	-0.0087	1.94	0.0256
Turku / Abo, Finland	1922.04	2022.96	100.92	-3.44	4.28	2.27	3.28	5.78	TUO2, TUOR	4.53	0.0449	1.09	0.0807
Los Angeles, CA, USA	1923.96	2023.96	100.00	1.07	-0.45	-0.07	-0.26	-0.92	CRHS	-0.59	-0.0059	0.48	0.0146
Raahel / Brahestad, Finland	1922.54	2022.96	100.42	-6.61	10.31	8	9.16	9.85	PYHA	9.50	0.0946	2.89	0.1228
La Jolla, CA, USA	1924.87	2023.96	99.09	2.03	-0.43	-0.09	-0.26	-2.56	SPW2	-1.41	-0.0142	0.62	-0.0147
Venezia (Punta Della Salute), Italy	1909.04	2000.96	91.92	2.44	0.21	0.34	0.28	-1.53	VEN1	-0.63	-0.0068	1.81	-0.0105
Astoria, OR, USA	1925.12	2023.96	98.84	-0.14	-1.78	-0.81	-1.30	0.40	TPW2	-0.45	-0.0045	-0.59	0.0072
Washington, DC, USA	1924.96	2023.96	99.00	3.47	-1.12	-0.23	-0.68	-0.81	USN8	-0.74	-0.0075	2.73	0.0138
Lagos, Portugal	1908.79	1999.12	90.33	1.61	-0.04	-0.09	-0.07	-0.24	LAGO	-0.15	-0.0017	1.46	-0.0427
Foglo / Degerby, Aland Islands	1923.96	2022.96	99.00	-3.59	4.59	2.6	3.60	6.04	DEGE	4.82	0.0487	1.23	0.0681
Nedre Gavle, Sweden	1896.04	1986.88	90.84	-6.04	6.58	4.65	5.62	8.10	4GAV, 1GAT	6.86	0.0755	0.82	0.0932
Tonoura, Japan	1894.04	1984.21	90.17	0.31	0.83	0.75	0.79	-1.46	G209	-0.34	-0.0037	-0.03	-0.0429
Hilo, HI, USA	1927.04	2023.96	96.92	3.12	0.3	0.18	0.24	-1.64	HILO	-0.70	-0.0072	2.42	-0.0202
Sewells Point, VA, USA	1927.62	2023.96	96.34	4.79	-1.02	-0.05	-0.54	-1.64	SPVA	-1.09	-0.0113	3.70	0.0172
Mayport, FL, USA	1928.37	2023.96	95.59	2.89	-0.63	-0.09	-0.36	0.12	KREG	-0.12	-0.0013	2.77	0.0366
Tregde, Norway	1927.79	2022.96	95.17	0.37	1.06	0.27	0.67	1.51	TGDE	1.09	0.0114	1.45	0.0304
Annapolis, MD, USA	1928.71	2023.96	95.25	3.80	-1.2	-0.3	-0.75	-1.90	ANP6	-1.33	-0.0139	2.48	0.0049
Heimsjø, Norway	1928.04	2022.96	94.92	-1.23	2.24	1	1.62	4.41	TRDS	3.01	0.0318	1.79	0.0613
Quarry Bay, Hong Kong	1929.37	2022.96	93.59	1.59	0.68	0.6	0.64	0.08	HKQT	0.36	0.0038	1.95	0.0355
Newport, RI, USA	1930.79	2023.96	93.17	2.92	-1.83	-1.07	-1.45	-0.92	NPRI	-1.19	-0.0127	1.74	0.0090
Klagshamn, Sweden	1929.96	2022.96	93.00	0.42	0.34	-0.29	0.03	0.90	1MAL	0.46	0.0050	0.88	0.0252
Wajima, Japan	1930.04	2022.96	92.92	0.21	0.8	0.71	0.76	0.05	G111	0.40	0.0043	0.62	0.0779
Hosojima, Japan	1930.04	2022.96	92.92	-0.07	0.77	0.72	0.75	0.05	J094	0.40	0.0043	0.33	0.0362

Kings Pt/Willets Pt, NY, USA	1931.62	2023.96	92.34	2.63	-1.69	-0.9	-1.30	-1.06	NYQN	-1.18	-0.0128	1.46	0.0030
Bjorn, Sweden	1892.04	1976.96	84.92	-6.12	6.48	4.48	5.48	8.23	OHNA	6.86	0.0807	0.74	0.0771
Polyarniy, Russia	1906.54	1990.96	84.42	-1.53	0	0	0.00	3.77	MUR3	1.89	0.0223	0.36	0.0383
Sandy Hook, NJ, USA	1932.87	2023.96	91.09	4.20	-1.71	-0.87	-1.29	-2.81	SHK5	-2.05	-0.0225	2.15	-0.0049
Pointe-Au-Pere, Canada	1900.04	1983.96	83.92	-0.37	-0.55	-1.4	-0.98	2.69	PPER	0.86	0.0102	0.49	0.0930
St Georges Island Esso Pier, Bermuda	1932.87	2023.96	91.09	2.19	-1.07	-0.47	-0.77	-0.86	BRMU	-0.82	-0.0089	1.38	-0.0067
Crescent City, CA, USA	1933.04	2023.96	90.92	-0.79	-0.9	0.01	-0.45	2.43	CACC	0.99	0.0109	0.20	0.0019
Santa Monica, CA, USA	1933.04	2023.96	90.92	1.52	-0.44	-0.04	-0.24	0.10	UCLP	-0.07	-0.0008	1.45	-0.0065
Buenos Aires, Argentina	1905.04	1987.96	82.92	1.57	0.94	0.76	0.85	1.58	IGM1	1.22	0.0147	2.79	0.0604
Southend, UK	1933.04	2015.96	82.92	1.23	0.04	0.12	0.08	-0.23	SHOE	-0.08	-0.0009	1.16	-0.0058
Friday Harbor, WA, USA	1934.04	2023.96	89.92	1.18	-0.8	-0.07	-0.44	0.09	SC02	-0.17	-0.0019	1.01	0.0036
Unalaska, AK, USA	1934.04	2023.96	89.92	-3.96	0.46	0.49	0.48	3.19	AV19	1.83	0.0204	-2.13	0.0270
Neah Bay, WA, USA	1934.62	2023.96	89.34	-1.73	-1.37	-0.56	-0.97	3.64	NEAH	1.34	0.0150	-0.39	-0.0004
Rauma / Raumo, Finland	1933.04	2022.96	89.92	-4.42	5.97	3.81	4.89	6.59	OLKI	5.74	0.0638	1.32	0.0841
Juneau, AK, USA	1936.04	2023.96	87.92	-13.42	1.38	1.7	1.54	16.69	JNU1	9.12	0.1037	-4.31	0.0527
Cebu, Philippines	1935.37	2022.96	87.59	1.65	0.67	0.64	0.66	-4.74	PCEB	-2.04	-0.0233	-0.39	0.0563
St John's, Nfld., Canada	1935.62	2021.96	86.34	2.20	-1.12	-0.43	-0.78	-0.44	STJO	-0.61	-0.0070	1.59	0.0057
Sassnitz, Germany	1935.87	2022.79	86.92	1.03	0.3	-0.16	0.07	0.65	SASS	0.36	0.0041	1.39	0.0244
Mínimo			82.92	-13.42	-2.25	-1.98	-2.1150	-4.8100		-2.62	-0.0233	-4.31	-0.0429
Máximo			215.42	6.64	10.49	8.28	9.3850	16.6900		9.50	0.1037	4.52	0.1456
Promedio			115.35	0.32	0.91	0.68	0.7980	1.1138		0.96	0.0091	1.27	0.0227



ARTÍCULO / ARTICLE

Apropiación social de la ley 2268 de 2022 a través de herramientas lúdicas: estrategias educativas para pescadores artesanales en Tumaco y Buenaventura

Social appropriation of law 2268 of 2022 through playful tools: educational strategies for artisanal fishermen in Tumaco and Buenaventura

Lady Roa ¹

0009-0006-3905-7049
layirohe31@gmail.com

Yesid Benítez ²

0009-0004-1813-9219
yesidbenitez94@gmail.com

Daniel Guerrero ²

00000-0002-2004-9018
daniel.guerrero@invemar.org.co

1. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS

2. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés"-INVEMAR.

* Autor de correspondencia/Corresponding Author

Recibido / Received: 30/12/2024

Aceptado / Accepted: 15/05/2025

Citación / Citation: Roa, L.; Benítez, Y. Guerrero, B. 2025. Apropiación social de la Ley 2268 de 2022 a través de herramientas lúdicas: estrategias educativas para pescadores artesanales en Tumaco y Buenaventura. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2):134-160

RESUMEN

Las comunidades de la ruralidad dispersa enfrentan barreras significativas para acceder y entender el contenido de las leyes. Para ayudar a superar estas barreras, en este trabajo se realizaron talleres participativos basados en la creación conjunta de juegos educativos para simplificar conceptos legales y promover la apropiación social de la normatividad. Este artículo analiza la apropiación social de la Ley 2268 de 2022 en las comunidades de pesca artesanal de Tumaco y Buenaventura, la cual empleó actividades lúdicas como herramienta educativa. El enfoque metodológico combinó la investigación acción participativa y el diseño centrado en las personas, lo que permitió la co-creación de 14 prototipos lúdicos adaptados a las realidades socioeconómicas y culturales de los pescadores artesanales. Los resultados mostraron que las actividades desarrolladas facilitaron el aprendizaje colaborativo, superaron las barreras de lenguaje y alfabetización, y generaron una mayor aceptación de la Ley 2268 en las comunidades. A pesar de los retos enfrentados, como el desconocimiento generalizado de la ley, la falta de acceso a información y la resistencia al cambio, el enfoque lúdico demostró ser una herramienta efectiva para la apropiación social del conocimiento. Este documento expone un caso de estudio donde se implementaron herramientas lúdicas en poblaciones rurales, motivando la participación y el empoderamiento.

Palabras clave: apropiación social del conocimiento, Ley 2268, comunidades pesqueras, metodología lúdica, investigación acción participativa

ABSTRACT

Communities in dispersed rural areas face significant barriers in accessing and understanding the content of laws. To help overcome these barriers, this work implemented participatory workshops focused on the joint creation of educational games that simplified legal concepts and fostered a greater understanding and applicability of the regulations. This paper analyzes the social appropriation of Law 2268 of 2022 in the artisanal fishing communities of Tumaco and Buenaventura, which employed playful activities as an educational tool. The methodological approach combined participatory action research and human-centered design, which enabled the co-creation of 14 playful prototypes adapted to the socio-economic and cultural realities of the fishermen. The results showed that the developed activities facilitated collaborative learning, overcame language and literacy barriers, and generated a greater acceptance of Law 2268 in the communities. Despite the challenges faced, such as widespread ignorance of the law, lack of access to information, and resistance to change, the play-based approach proved to be an effective strategy for the social appropriation of knowledge. This document presents a case study where playful tools were implemented in rural communities, motivating and empowering participation.

Key words: social appropriation of knowledge, Law 2268, fishing communities, playful methodology, participatory action research.



INTRODUCCIÓN

La Ley 2268 constituye un progreso importante en la protección social de los pescadores artesanales debido a que establece mecanismos para formalizar la actividad pesquera y ofrece un sistema de recuperación de medios de vida durante los periodos de veda, promoviendo la sostenibilidad y el bienestar económico de los colectivos pesqueros. No obstante, su alcance ha sido limitado debido a barreras lingüísticas, culturales y de acceso a la información. En numerosos casos, las poblaciones rurales se enfrentan con obstáculos para comprender y poner en práctica esta normativa, lo que dificulta la ejecución efectiva de sus derechos. Este artículo examina el proceso de apropiación social de la ley en seis comunidades de pescadores artesanales de las áreas rurales dispersas de Tumaco y Buenaventura, Colombia.

Dado el objetivo de esta ley, es fundamental que su marco legal sea entendido y aplicado adecuadamente con el fin de beneficiar a las comunidades con sus disposiciones. Sin embargo, falencias en cubrimiento de escolaridad del territorio, necesidades básicas insatisfechas, vulnerabilidad socioeconómica y marcada dependencia por la pesca artesanal, demandan estrategias educativas dirigidas a la apropiación del conocimiento. En este sentido, dada la complejidad del lenguaje jurídico y el entorno socioeconómico de estas comunidades, el presente estudio propone aplicar un enfoque fundamentado en actividades lúdicas y participativas para facilitar la apropiación del saber jurídico en comunidades de pescadores del litoral Pacífico colombiano, donde se espera que la Ley 2268 tenga efectos directos.

Para atender esta necesidad, un equipo de investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” – Invemar diseñó un conjunto de metodologías lúdicas para lograr la comprensión de conceptos clave de la ley en la ruralidad dispersa del distrito de Buenaventura y el municipio de Tumaco durante los meses de noviembre y diciembre de 2023 y enero de 2024. Durante este período, se realizaron un conjunto de talleres enfocados en la aplicación de técnicas lúdicas de apropiación social del conocimiento (ASC) para lograr la comprensión del lenguaje jurídico y el reconocimiento de los derechos y obligaciones que establece esta ley para garantizar el acceso a los mecanismos de protección social y medios de vida focalizados en pescadores artesanales. Específicamente, se analiza la creación de prototipos de juegos educativos como resultado del entendimiento de conceptos relacionados a la

INTRODUCTION

This article examines the social appropriation process of the Colombian Law 2268 in six communities of artisanal fishermen in the dispersed rural areas of Tumaco and Buenaventura, Colombia. This law represents significant progress in the social protection of artisanal fishermen, as it establishes mechanisms to formalize fishing activities and offers a system for livelihood recovery during ban seasons, promoting sustainability and the economic well-being of fishing communities. However, its reach has been limited due to linguistic, cultural, and information access barriers. In numerous cases, rural populations face obstacles in understanding and implementing this regulation, which hinders the effective exercise of their rights.

Given the objective of this law, it is essential for its legal framework to be understood and applied appropriately in order to benefit the communities with its provisions. However, shortcomings in the territory's educational coverage, unmet basic needs, socioeconomic vulnerability, and marked dependence on artisanal fishing demand educational strategies aimed at the appropriation of knowledge. In this regard, given the complexity of legal language and the socioeconomic environment of these communities, this study proposes the application of an approach based on recreational and participatory activities, with the purpose of facilitating the appropriation of legal knowledge in the fishing communities of the Colombian Pacific coast, where Law 2268 is expected to have direct effects.

To address this need, a team of researchers from the José Benito Vives de Andrés Institute for Marine and Coastal Research (INVEMAR) designed a set of didactic methodologies for understanding the aforementioned law's key concepts, which was implemented in the dispersed rural areas of the Buenaventura District and the Municipality of Tumaco between November-December 2023 and January 2024. During this period, a series of workshops were conducted, which focused on the application of didactic techniques for the social appropriation of knowledge (SAK) aimed at understanding legal language and recognizing the rights and obligations established by this law, in order to ensure access to social protection mechanisms and livelihood means for artisanal fishermen. Specifically, the creation of educational game prototypes for grasping related concepts was analyzed, which served as a tool to overcome obstacles in relation to access and comprehension, promoting the exchange

ley, lo cual se evidencia como una herramienta para vencer los obstáculos de acceso y entendimiento de la misma, fomentando el intercambio de conocimientos y la participación.

La selección de este método se fundamenta en el aprendizaje experiencial, el cual se concibe como resultado de la experiencia directa y la reflexión activa sobre la misma (Kolb, 1984); adicionalmente, pues proporciona herramientas para la integración social y desarrollo de habilidades (Caillois, 2001). Finalmente, se define y propone el juego como un medio esencial para la transmisión cultural y educativa (Huizinga, 1980). Estas propuestas pedagógicas argumentan como las actividades lúdicas estimulan la interacción, el aprendizaje dinámico y sitúan el saber en las realidades culturales y sociales de las comunidades.

Adicionalmente, estos conceptos se implementan por medio de métodos de Investigación Acción Participativa (IAP) (Latorre, 2010), aplicando técnicas como la cartografía social, la lluvia de ideas y el diálogo de saberes. Estas herramientas facilitaron la identificación de problemáticas y soluciones desde una perspectiva comunitaria. Paralelamente, se implementó el Diseño Centrado en las Personas (DCP) (IDEO, 2011), el cual se estructuró en tres fases principales: (i) *inspiración*, realizando diagnósticos participativos para comprender los desafíos de apropiación de la Ley 2268 en las comunidades; (ii) *ideación*, desarrollando prototipos lúdicos a través de sesiones de co-creación con los pescadores; y (iii) *implementación*, evaluando, validando y ajustando cada prototipo en talleres de socialización con los participantes. Estas metodologías aseguran un proceso incluyente al intervenir en la realidad, involucrando las comunidades en el desarrollo de soluciones, potenciando su sensación de independencia y pertenencia.

Para documentar estas experiencias, este trabajo presenta seguido de esta introducción, una sección discutiendo las dificultades de la comprensión del lenguaje jurídico y el señalamiento de estrategias para lograr su entendimiento, seguido de la metodología aplicada para el estudio en el territorio. Posteriormente, la sección con los resultados obtenidos al implementar las técnicas de apropiación del lenguaje y algunas discusiones al respecto; por último, se hacen comentarios y conclusiones del estudio de caso.

of knowledge and participation.

The selection of this method was based on experiential learning, conceived as the result of direct experience and active reflection (Kolb, 1984). Additionally, play was suggested as a tool for social integration and skills development (Caillois, 2001); it has been defined and proposed as an essential means for cultural and educational transmission (Huizinga, 1980). These pedagogical proposals argue how recreational activities stimulate interaction and dynamic learning while situating knowledge within the cultural and social realities of communities.

These concepts were implemented through participatory action research (PAR) methods (Latorre, 2010), applying techniques such as social mapping, brainstorming, and knowledge dialogue. These tools facilitated the identification of problems and solutions from the community's perspective. In parallel, a human-centered design approach (HCD) (IDEO, 2011) was implemented, which was structured into three main phases: (i) *inspiration*: conducting participatory diagnostics to understand the challenges of appropriating Law 2268 in the communities; (ii) *ideation*: developing didactic prototypes through co-creation sessions with fishermen; and (iii) *implementation*: evaluating, validating, and adjusting each prototype in socialization workshops conducted with the participants. These methodologies ensure an inclusive process when intervening in reality, involving communities in the development of solutions, thereby enhancing their sense of independence and belonging.

To document our work, following this introduction, this document discusses the difficulties of understanding legal language and the identification of strategies to achieve its comprehension. In addition, the document outlines the methodology applied in the territory within the framework of this research; hereafter, this document presents the results obtained from implementing language appropriation techniques, as well some discussions on the matter. Finally, comments and draws conclusions on this case study are presented.

El lenguaje jurídico estructurado, dificultades para su comprensión y estrategias pedagógicas para su entendimiento

La competencia comunicativa se refiere a la habilidad de un individuo para emplear el lenguaje de forma eficaz y apropiada en diferentes entornos sociales y culturales (Hymes, 1972). Esta habilidad abarca el manejo de la gramática, el entendimiento de las reglas de uso, las costumbres de interacción y el sentido cultural de las palabras y expresiones (Canale y Swain, 1980). En este contexto, el lenguaje es visto como un instrumento esencial para la interacción social, pues proporciona herramientas para la comunicación, incluso la adaptación a diversas circunstancias, la interpretación de normas tanto implícitas como explícitas y la negociación.

Particularmente, la práctica legal es una actividad profundamente lingüística, por lo que las habilidades comunicacionales juegan un papel fundamental en el trabajo de los profesionales del derecho ya que facilita la interpretación y aplicación de las normas (Taranilla, 2012); sin embargo, el lenguaje estructurado es una limitante para lograr el pleno entendimiento en personas que no tienen un entrenamiento en ciencias jurídicas. Para superar esta limitante, se ha evidenciado que la incorporación de actividades recreativas en la educación legal facilita el entendimiento de conceptos complicados y potencia la habilidad de los estudiantes para poner en práctica el derecho en situaciones reales (Tapia *et al.*, 2017).

En general, la literatura sobre la pedagogía reconoce que la implementación de métodos lúdicos en la educación refuerza la apropiación de conceptos complejos, facilitando su comprensión (Tapia *et al.*, 2017). Esto se debe a que el juego constituye un elemento fundamental de la cultura y la sociedad, el cual genera espacios de interacción donde se transmiten valores, se refuerzan normas sociales y se fomenta el aprendizaje colectivo (Huizinga, 1980). Así mismo, los juegos ofrecen un marco útil para entender cómo diversas clases de actividades lúdicas pueden influir en el comportamiento humano y, en consecuencia, en el proceso de aprendizaje (Caillois, 2001). En adición a lo anterior, el modelo de aprendizaje experiencial apoya los descubrimientos y la innovación, por lo tanto, las actividades prácticas y lúdicas empleadas en la investigación han permitido la apropiación perdurable del lenguaje jurídico (Kolb, 1984), superando los obstáculos lingüísticos y culturales, así como las barreras de poder y control que surgen en el uso del lenguaje

Structured legal language – difficulties and pedagogical strategies for comprehension

Communicative competence refers to an individual's ability to use language effectively and appropriately in different social and cultural settings (Hymes, 1972). This skill encompasses the handling of grammar, the understanding of usage rules, interaction customs, and the cultural meaning of words and expressions (Canale and Swain, 1980). In this context, language is seen as an essential tool for social interaction, as it provides a means for communication, enabling adaptation to various circumstances, the interpretation of both implicit and explicit norms, and negotiation.

In particular, legal practice is a profoundly linguistic activity, which is why communication skills play a fundamental role in the work of legal professionals, facilitating the interpretation and application of laws (Taranilla, 2012). However, structured language is a limitation for achieving full understanding in people with no training in legal sciences. To overcome this limitation, it has been shown that incorporating recreational activities in legal education facilitates the understanding of complicated concepts and enhances students' ability to apply law in real situations (Tapia *et al.*, 2017).

In general, the literature on pedagogy recognizes that the implementation of playful methods in education reinforces the appropriation of complex concepts, facilitating their understanding (Tapia *et al.*, 2017). This is because play constitutes a fundamental element of culture and society, which creates spaces for interaction aimed at transmitting values, strengthening social norms, and promoting collective learning (Huizinga, 1980). Likewise, games provide a useful framework for understanding how various types of playful activities can influence human behavior and, consequently, the learning process (Caillois, 2001). In addition to the above, the experiential learning model supports discoveries and innovation. Therefore, the practical and playful activities used in this research allowed for the enduring appropriation of legal language (Kolb, 1984), overcoming linguistic and cultural obstacles, as well as the barriers of power and control inherent in the use of language (Barsky, 1991).

From a deeper linguistic perspective, generative grammar theory recognizes how the often intricate structures of legal

(Barsky, 1991).

Desde una perspectiva lingüística más profunda, la teoría de la gramática generativa reconoce cómo las estructuras del lenguaje jurídico, frecuentemente intrincadas, afectan su interpretación, dado que las reglas sintácticas subyacentes condicionan la manera en que los hablantes procesan los enunciados normativos (Chomsky, 1957). En el ámbito del derecho, algunos estudios han analizado cómo la complejidad gramatical del discurso legal influye en su accesibilidad y claridad para el público (Tiersma, 1999). En este sentido, las construcciones lingüísticas densas y técnicas pueden dificultar la comprensión de leyes en contextos rurales (Chomsky, 1999). Frente a este desafío, algunos enfoques pedagógicos han optado por implementar estrategias lúdicas como recurso de mediación, facilitando la traducción de estructuras jurídicas en formas más fáciles de entender. De este modo, se aborda el problema sociolingüístico al proponer alternativas que ayuden a tener una apropiación más significativa del contenido normativo (Barsky, 1991).

En el contexto de la tecnología y la identidad, la inclusión de componentes digitales en las actividades lúdicas ha probado ser particularmente atractivo para los integrantes más jóvenes de las comunidades (Frissen, 2015). Con este enfoque, el principio de estética lúdica ha orientado el diseño de recursos educativos, impulsando una mejor entendimiento y adopción del saber jurídico (Flanagan, 2013). Asimismo, la integración de conocimientos locales y étnicos ha sido importante para fomentar una apropiación inclusiva y colaborativa. Sugieren que esta estrategia es fundamental para superar las barreras de entendimiento las cuales podrían surgir en diferentes contextos sociales y territoriales (Barsky, 1991; Buraschi y Aguilar, 2019;). Además, la democratización de la ciencia y la tecnología apoyan la estrategia ya que resulta imprescindible hacer accesible el saber jurídico mediante la participación de la comunidad y la aplicación de métodos lúdicos (Chingaté, 2009). En ese sentido, la investigación en ciencias jurídicas se ha motivado a crear estrategias basadas en la apropiación social del conocimiento orientadas a lograr que su información y conceptos sean más accesibles y útiles para las comunidades rurales (Marín, 2012). Adicionalmente, al favorecer esta apropiación, se consolidan procesos de aprendizaje y desarrollo comunitario esenciales en las actividades recreativas y participativas (MinCiencias, 2021).

Por lo mencionado anteriormente, el método de diseño

language affect its interpretation, given that underlying syntactic rules condition the way speakers process normative statements (Chomsky, 1957). In the field of law, some studies have analyzed how the grammatical complexity of legal discourse influences its accessibility and clarity for the public (Tiersma, 1999). In this sense, dense and technical linguistic constructions can hinder the understanding of laws in rural contexts (Chomsky, 1999). Faced with this challenge, some pedagogical approaches have chosen to implement playful strategies as a mediation resource, facilitating the translation of legal structures into forms that are easier to understand. Thus, the sociolinguistic problem is addressed by proposing alternatives that help to achieve a more meaningful appropriation of normative content (Barsky, 1991).

In the context of technology and identity, the inclusion of digital components in recreational activities has proven to be particularly attractive to the younger members of communities (Frissen, 2015). With this approach, the principle of playful aesthetics has guided the design of educational resources, promoting a better understanding and adoption of legal knowledge (Flanagan, 2013). Likewise, the integration of local and ethnic knowledge has been important in fostering an inclusive and collaborative appropriation (Barsky, 1991; Buraschi and Aguilar, 2019). The literature suggests that this strategy is essential for overcoming the barriers of understanding that could arise in different social and territorial contexts (Buraschi and Aguilar, 2019). Moreover, the democratization of science and technology supports this strategy, as it is essential to make legal knowledge accessible through community participation and the application of playful methods (Chingaté, 2009). In this regard, research in legal sciences has striven to create strategies aimed at the social appropriation of knowledge which make information and concepts more accessible and useful for rural communities (Marín, 2012). Additionally, by promoting this appropriation, essential processes regarding learning and community development are consolidated in recreational and participatory activities (MinCiencias, 2021).

For the reasons mentioned above, the participatory design method was key in our research, allowing the rural communities of Tumaco and Buenaventura to actively participate in the creation of playful prototypes, thus promoting the social appropriation of legal knowledge (Escobar, 2019). This integration has become especially relevant in these communities, where variations in communication methods can lead to misunderstandings

participativo ha sido clave en la investigación, posibilitando que las comunidades rurales de Tumaco y Buenaventura participen de manera activa en la elaboración de prototipos lúdicos, fomentando de esta manera la apropiación social del conocimiento legal (Escobar, 2019). Esta integración cobra especial relevancia en dichas comunidades, donde las variaciones en los métodos de comunicación pueden generar malentendidos en la interpretación de la información y en particular de la Ley 2268; por lo tanto, la implementación de estrategias pedagógicas que asuman como fundamental la necesidad de garantizar una apropiación efectiva de las normativas legales en estos contextos se vuelve indispensable.

Finalmente, este estudio de caso relata las experiencias de la aplicación de componentes lúdicos educativos, los cuales constituyen un recurso efectivo para fomentar la apropiación social de la Ley 2268 en las áreas rurales dispersas de Tumaco y Buenaventura. Esta perspectiva holística no solo supera las barreras culturales y lingüísticas, sino que además, promueve el dialogo de saberes con el fin de beneficiar la integración de un marco jurídico específico, fortaleciendo a estas comunidades en el proceso. Por lo tanto, este estudio expone un mecanismo para cerrar la brecha de comprensión del lenguaje jurídico estructurado por medio de la aplicación de un modelo de aprendizaje adaptado a entornos rurales y con diversos sistemas de valores, ampliando la estrategia de asimilación social del saber.

METODOLOGÍA

Contexto del área de estudio

Este estudio se realizó en el marco del proyecto Protección Social para la Pesca y la Acuicultura en Colombia (SocPro4Fish), el cual tiene como objetivo promover la protección social en los sectores de la pesca y la acuicultura a pequeña escala en Colombia, reconociendo la importancia de estos para el desarrollo económico sostenible y la seguridad alimentaria del país. Este proyecto fue implementado en dos etapas entre octubre de 2021 y marzo de 2024 con la finalidad de disminuir la vulnerabilidad y las brechas de información en materia de acceso a la protección social para los pescadores y acuicultores a pequeña escala en Colombia.

Según el censo pequeño realizado en 2019, en la región Pacífico de Colombia, sólo 2,7 % de los pescadores (aproximadamente

in the interpretation of information – particularly regarding Law 2268. Therefore, the implementation of pedagogical strategies that fundamentally address the need to ensure an effective appropriation of legal regulations in these contexts is indispensable.

This case study recounts the experiences derived from applying playful educational components, which constitute an effective resource for promoting the social appropriation of Law 2268 in the dispersed rural areas of Tumaco and Buenaventura. This holistic perspective not only overcomes cultural and linguistic barriers but also promotes knowledge dialogue with the aim of benefiting the integration of a specific legal framework while strengthening these communities. This study presents a mechanism to bridge the comprehension gap of structured legal language through a learning model adapted to rural environments and with diverse value systems, thus expanding the strategy for the social assimilation of knowledge.

METHODOLOGY

Context of the study area

This study was conducted within the framework of the project **titled Social Protection for Fisheries and Aquaculture in Colombia** (SocPro4Fish), which aims to provide social protection for the small-scale fishing and aquaculture sectors in Colombia, recognizing their importance for the country's sustainable economic development and food security. This project was implemented in two stages between October 2021 and March 2024, with the aim of reducing vulnerability and information gaps regarding access to social protection for small-scale fishermen and aquaculture workers in Colombia.

According to the fishing census conducted in 2019 in the Pacific region of Colombia, only 2.7% of the fishermen (approximately 375 people) are part of the contributory social protection system, while 93% (around 12,938 people) are part of the subsidized regime. The remaining 4.3% (approximately 599 people) claim not to know or belong to either (AUNAP and UNDP, 2019). One of the main factors that hinders fishermen's access to the contributory social security system is the low income derived from their activity, which forces them to resort to social assistance programs to ensure the protection of their livelihoods and a decent quality of life. According to the fishing census, 75.8% of

375 personas) forma parte del sistema contributivo de protección social, mientras 93 % (alrededor de 12 938 personas) hace parte del régimen subsidiado; el otro 4,3 % (aproximadamente 599 personas) declara no saber o no pertenecer a ninguno de los dos (AUNAP y PNUD, 2019). Uno de los principales factores que dificultan el acceso de los pescadores al sistema de seguridad social contributivo son los bajos ingresos derivados de su actividad, lo que los obliga a recurrir a programas de asistencia social para garantizar la protección de sus medios de vida y una calidad de vida digna. Según el censo pesquero, 75,8 % de los pescadores artesanales de la región Pacífica (aproximadamente 10 552 personas) reporta ingresos de hasta un salario mínimo legal vigente (SMLV), mientras que 14,3 % (alrededor de 1 988 pescadores) indica que sus ingresos oscilan entre uno y dos SMLV, aunque estos presentan una alta variabilidad a lo largo del año (AUNAP y PNUD, 2019).

Particularmente, la pesca marina a pequeña escala es una actividad ejecutada en aguas costeras con baja tecnología y escaso capital por pescadores tradicionales de subsistencia y representa una fuente directa e indirecta de empleo para las comunidades aledañas. De acuerdo con la Ley 2268, la pesca artesanal o a pequeña escala se define como aquella actividad extractiva llevada a cabo de manera individual, familiar o colectiva, utilizando embarcaciones menores de 10 toneladas de registro bruto y artes de pesca tradicionales de bajo impacto ambiental. Gran parte de los pescadores artesanales destina su producción a la comercialización y al autoconsumo. Sin embargo, estos suelen depender de intermediarios para vender su producción y sus limitados recursos económicos dificultan el acceso al crédito (Selvaraj *et al.*, 2022).

Por otro lado, para 2020 se estimó que 31,43 % de las personas de la zona rural de Buenaventura tiene sus necesidades básicas insatisfechas, mientras que este indicador es de 38,83 % para la ruralidad de Tumaco (DANE, 2022). En materia de educación, únicamente 37,9 % de los pescadores han terminado el bachillerato y uno de cada cinco reconoce no saber leer ni escribir (AUNAP y PNUD, 2019). Por otro lado, la cobertura de educación en es de Tumaco 69,22 % y para Buenaventura es de 72,67 % (MinEducación, 2022).

artisanal fishermen in the Pacific region (approximately 10,552 people) report incomes of up to one legal minimum monthly wage (LMMW), while 14.3% (around 1,988 fishermen) indicate that their income ranges between one and two LMMW, albeit with high variability throughout the year (AUNAP and UNDP, 2019).

In particular, small-scale marine fishing is a low-technology, low-capital activity carried out in coastal waters by traditional subsistence fishermen which represents a direct and indirect source of employment for the surrounding communities. According to Law 2268, artisanal or small-scale fishing is defined as an extractive activity that is performed individually, with family members, or collectively, using vessels with capacities of less than 10 gross tons and traditional fishing gear with low environmental impact. A large part of artisanal fishermen allocates their production to commercialization and self-consumption. However, they often rely on intermediaries to sell their catch. It should also be noted that their limited economic resources make access to credit difficult (Selvaraj *et al.*, 2022).

On the other hand, as of 2020, it was estimated that 31.43% of the people in the rural area of Buenaventura had unmet basic needs. For the rural area of Tumaco, the value of this indicator was 38.83% (DANE, 2022). In terms of education, only 37.9% of fishermen had completed high school, and one in five admitted to not knowing how to read or write (AUNAP and UNDP, 2019). Education coverage is 69.22% in Tumaco and is 72.67% in Buenaventura (MinEducación, 2022).

Investigación Acción Participativa (IAP) y Diseño Centrado en las Personas (DCP)

Para realizar este estudio, se adoptó una metodología cualitativa y participativa que combina los enfoques de la IAP y el DCP en tres fases:

- Diagnóstico Participativo (Investigación Acción Participativa)
- Co-creación de Prototipos Lúdicos (Diseño Centrado en las Personas)
- Validación de Prototipos

En la fase inicial, se emplearon herramientas como la cartografía social y la lluvia de ideas, lo que permitió ajustar las estrategias a las condiciones socioeconómicas y culturales de las comunidades pesqueras del Pacífico colombiano.

De acuerdo con los datos del censo de pescadores de 2019, 16,7 % de los pescadores de la región (aproximadamente 2 323 personas) eran analfabetas, y cerca de 40 % (alrededor de 5566 personas) tenía como nivel educativo más alto la primaria. Estas cifras destacan la necesidad de enfoques pedagógicos más accesibles y lúdicos, considerando que la mayoría de los participantes eran adultos con niveles educativos bajos y altos niveles de pobreza multidimensional (carencias en salud, educación, trabajo, calidad de vida y medio ambiente), lo cual impacta directamente sus oportunidades de desarrollo.

Por un lado, la IAP involucra activamente a los participantes en todas las fases del proceso de investigación, asegurando la co-creación de soluciones ([Latorre, 2010](#)). Esta metodología busca comprender las problemáticas sociales a través de la colaboración y la reflexión y se caracteriza por poner énfasis en la participación de la población en la generación de conocimientos y puntos de vista que sirvan para tomar decisiones en los procesos sociales y de investigación. De esta manera, se garantiza que el conocimiento crítico y colectivo fortalezca las capacidades de las comunidades, brindándoles la oportunidad de intervenir en su realidad de forma práctica. Además, la aplicación de este enfoque en grupos de trabajo facilita la mejora de sus prácticas sociales y cotidianas. Durante esta fase diagnóstica, se realizaron 24 entrevistas exploratorias informales con líderes y lideresas comunitarias en cada uno de

Participatory action research (PAR) and human-centered design (HCD)

To conduct this study, a qualitative and participatory methodology was adopted which combined PAR and HCD in three phases:

- Participatory diagnosis (PAR)
- Co-creation of playful prototypes (HCD)
- Prototype validation

In the initial phase, tools such as social mapping and brainstorming were used, which made it possible to adjust the strategies to the socioeconomic and cultural conditions of the fishing communities of the Colombian Pacific.

According to the data from the 2019 census, 16.7% of the fishermen in the region (approximately 2,323 people) were illiterate, and about 40% (around 5,566 people) had primary school as their highest level of education. These figures highlight the need for more accessible and didactic pedagogical approaches, considering that the majority of participants were adults with low educational levels and high levels of multidimensional poverty (*i.e.*, insufficient healthcare, education, work, quality of life, and environmental conditions), which directly impacted their development opportunities.

As the first component of the implemented approach, PAR actively involves participants in all phases of the research process, thereby ensuring the co-creation of solutions ([Latorre, 2010](#)). This methodology seeks to understand social issues through collaboration and reflection, and it emphasizes the participation of the population in generating knowledge and viewpoints to support decision-making in social and research processes. Thus, it is ensured that critical and collective knowledge strengthens the capacities of communities, providing them with the opportunity to intervene in their reality in a practical way. Moreover, the application of this approach in work groups facilitates the improvement of social and everyday practices. During this diagnostic phase, 24 informal exploratory interviews were conducted with community leaders in each of the territories, with the aim of identifying barriers to information access and perceptions about Law 2268. These interviews, typical of PAR, also helped to strengthen trust with key stakeholders and understand the context prior to the participatory

los territorios, orientadas a identificar barreras de acceso a la información y percepciones sobre la Ley 2268. Estas entrevistas, propias de la IAP, también permitieron fortalecer la confianza con actores clave y comprender el contexto previo a los talleres participativos. Posteriormente, se llevaron a cabo seis talleres de cartografía social, uno por comunidad, con la participación de 368 pescadores artesanales. Durante estas sesiones se presentaron de forma clara los contenidos de la Ley 2268, con el apoyo de entidades como DIMAR, AUNAP y Colpensiones, facilitando el diálogo de saberes y la recolección colaborativa de prácticas, desafíos y barreras normativas.

El DCP se enfoca en crear soluciones alineadas con las necesidades de los usuarios finales (IDEO, 2011). Esta es una técnica de resolución de problemas adaptada de los procesos de diseño de productos y servicios en el que las personas son el centro de la creación de soluciones que satisfagan sus necesidades y deseos de los usuarios. En este enfoque se basa el diseño para garantizar el éxito de un producto, involucrando al usuario en el proceso de creación, desde la conceptualización hasta la evaluación. Este método de diseño se caracteriza por empatizar con las personas con las que se está diseñando, generar las ideas, construir prototipos y compartirlo con otros usuarios para recibir retroalimentación, permitiendo las iteraciones para la mejora continua. Particularmente, esta metodología plantea que todos los problemas, incluso los relacionados con la pobreza, la igualdad de género y el agua potable, tienen solución en las personas que los enfrentan todos los días. El diseño centrado en el ser humano ofrece también la oportunidad de generar arraigos en soluciones reales de las personas (IDEO, 2015).

A partir de estos hallazgos, se conformaron 14 grupos de trabajo, con un promedio de 26 personas cada uno, quienes participaron en sesiones de co-creación. En estos espacios, se diseñaron 14 prototipos de juegos educativos enfocados en la apropiación de conceptos legales, el estímulo de prácticas sostenibles y el empoderamiento comunitario como eje de transformación. Durante la co-creación, se emplearon materiales accesibles como fichas, dados y papel, así como lecturas guiadas de la Ley 2268 acompañadas por una abogada experta en derecho social. Se aplicó la Taxonomía de Bloom para estructurar preguntas de diversos niveles de complejidad, garantizando una comprensión profunda y significativa del contenido normativo.

workshops. Subsequently, six social mapping workshops were conducted, one per community, with the participation of 368 artisanal fishermen. During these sessions, the contents of Law 2268 were clearly presented, with the support of entities such as DIMAR, AUNAP, and Colpensiones. This facilitated knowledge dialogue and the collaborative collection of practices, challenges, and regulatory barriers.

On the other hand, HDC focuses on creating solutions aligned with the requirements of end users (IDEO, 2011). This is a problem-solving technique adapted from the design of products and services in which people are at the center of the solutions developed, seeking to fulfill their needs and desires. This approach is the basis for the design of a successful product, as it involves the user throughout the process, from conceptualization to evaluation. This method is characterized by empathizing with those participating in the design, generating ideas, building prototypes, and sharing them with other users to receive feedback, thereby allowing for iteration and continuous improvement. Particularly, this methodology suggests that the solutions to all problems, including those related to poverty, gender equality, and drinking water, can be found with the people who face them every day. HCD also offers the opportunity to create roots in real solutions for people (IDEO, 2015).

In light of the above, 14 working groups were formed, with an average of 26 people each, who participated in co-creation sessions. In these spaces, 14 prototypes of educational games were designed while focusing on the appropriation of legal concepts, the stimulation of sustainable practices, and community empowerment as a transformation axis. During the co-creation process, accessible materials such as cards, dice, and paper were used, as well as guided readings of Law 2268 accompanied by a lawyer specializing in social law. Bloom's taxonomy was applied to structure questions of various levels of complexity, ensuring a deep and meaningful understanding of the normative content.

Población objetivo de trabajo

El acercamiento a las comunidades comenzó con un diagnóstico participativo realizado mediante talleres de socialización en seis regiones específicas: La Barra y Bazán Bocana en Buenaventura, así como Colorado, Curay, Chajal y Bajito Vaquería en Tumaco. Estos talleres, llevados a cabo entre noviembre de 2023 y enero de 2024, reunieron a 368 pescadores artesanales de todas las edades en sesiones de aproximadamente cuatro horas, con un promedio de 62 asistentes por taller. Durante la primera parte, se emplearon herramientas como la cartografía social y la lluvia de ideas, lo que permitió identificar barreras como el desconocimiento de la Ley 2268 y la complejidad de su lenguaje. Estas actividades sentaron las bases para diseñar estrategias de apropiación que integraran las perspectivas locales, promoviendo un diálogo de saberes que permitió conectar la normativa con las realidades culturales y socioeconómicas de las comunidades. Estas dinámicas se articularon mediante sesiones colaborativas donde los pescadores diseñaron mecánicas lúdicas centradas en derechos, deberes y aplicaciones prácticas de la normativa.

Target population

The approach to the communities began with a participatory diagnosis conducted through socialization workshops in six specific regions: La Barra and Bazán Bocana in Buenaventura; and Colorado, Curay, Chajal, and Bajito Vaquería in Tumaco. These workshops, held between November 2023 and January 2024, brought together 368 artisanal fishermen of all ages in sessions lasting approximately four hours, with an average of 62 attendees per workshop. During the first part, tools such as social mapping and brainstorming were used, which enabled the identification of barriers such as the lack of knowledge about Law 2268 and the complexity of its language. These activities laid the groundwork for designing appropriation strategies that integrated local perspectives, promoting a knowledge dialogue that allowed connecting regulations with the cultural and socioeconomic realities of the communities. These dynamics were articulated through collaborative workshops in the field, where fishermen designed playful mechanics focused on rights, duties, and the practical application of regulations.



Figura 1. Jornadas de trabajo en campo, ruralidad dispersa de Tumaco y Buenaventura.

Durante las fases intermedias y finales, los participantes co-crearon de 14 prototipos de juegos educativos para facilitar la comprensión de la Ley 2268, mediante sesiones colaborativas que utilizaron materiales simples como papel, fichas y dados. Se aplicaron encuestas pre y post-taller para comparar el nivel de conocimiento antes y después, las encuestas midieron avances en temas como vedas, formalización, seguridad social y deberes legales, mientras que los prototipos fueron evaluados

Figure 1. Field workshops in the dispersed rural areas of Tumaco and Buenaventura

During the intermediate and final phases, the participants co-created 14 prototypes of educational games to facilitate the understanding of Law 2268. This was done through collaborative sessions that used simple materials such as paper, tokens, and dice. Pre- and post-workshop surveys were conducted to compare the level of knowledge. The surveys measured progress in topics such as fishing ban seasons, formalization, social security, and legal duties, while prototypes were evaluated

en plenarias comunitarias con líderes territoriales, autoridades (Colpensiones, AUNAP, DIMAR) y pescadores, quienes aportaron sugerencias para optimizar claridad, diseño gráfico y pertinencia pedagógica, integrando elementos identitarios como mitos, gastronomía y prácticas ancestrales. En la etapa final, se desarrollaron plenarias comunitarias de validación, donde pescadores, líderes territoriales, autoridades e investigadores compartieron observaciones sobre los juegos creados. Estas sesiones permitieron integrar sugerencias, aclarar conceptos, reforzar el lenguaje normativo y consolidar el proceso de Apropiación Social del Conocimiento (ASC) mediante el diálogo participativo y la iteración creativa.

Para el análisis comparativo entre Tumaco y Buenaventura, se emplearon tres metodologías clave: cartografías sociales, retroalimentación cualitativa recopilada en los talleres y observaciones etnográficas del equipo investigador. En Tumaco, los juegos priorizaron temáticas como la gestión sostenible de manglares y el cumplimiento de vedas (*Guardianes del Manglar*), reflejando su contexto ecosistémico. Por su parte, en Buenaventura predominaron estrategias vinculadas a subsidios, seguridad social y formalización pesquera (*Rumbo a BEPS*), respondiendo a necesidades socioeconómicas locales. Estas diferencias, arraigadas en las particularidades territoriales, se incorporaron en las versiones finales de los prototipos.

RESULTADOS

El proceso de desarrollo de componentes lúdicos educativos en las comunidades rurales de Tumaco y Buenaventura incluyó a 368 participantes en talleres diseñados para crear juegos pedagógicos adecuados a los aspectos particulares de estos lugares (*Tabla 1*). La técnica empleada se diferenciaba por un enfoque participativo, donde pescadores y líderes comunitarios tuvieron una participación activa en todas las fases de diseño, garantizando que los juegos fueran culturalmente relevantes y adecuados a las circunstancias socioeconómicas de los participantes. Se desarrollaron mediante dinámicas participativas enfocadas en el diálogo de saberes y la integración comunitaria.

in community plenary sessions with territorial leaders, authorities (Colpensiones, AUNAP, DIMAR), and fishermen, who provided suggestions to optimize clarity, graphic design, and pedagogical relevance by integrating identity elements such as myths, gastronomy, and ancestral practices. In the final plenaries, fishermen, territorial leaders, authorities, and researchers shared observations about the games created. These sessions enabled the integration of suggestions, the clarification of concepts, the reinforcement of normative language, and the SAK through participatory dialogue and creative iteration.

For the comparative analysis between Tumaco and Buenaventura, three key methodologies were employed: social cartographies, qualitative feedback collected during the workshops, and ethnographic observations conducted by the research team. In Tumaco, the games prioritized themes such as sustainable mangrove management and compliance with fishing bans (*Guardians of the Mangrove*), reflecting their ecosystemic context. On the other hand, in Buenaventura, there was a predominance of strategies related to subsidies, social security, and fishing formalization (e.g., *Destination BEPS*), in response to local socioeconomic needs. These differences, rooted in territorial particularities, were incorporated into the final versions of the prototypes

RESULTS

The development of educational-recreational components in the rural areas of Tumaco and Buenaventura involved 368 participants in workshops designed to create pedagogical games suited to the particular aspects of these communities (*Table 1*). The technique used was characterized by a participatory approach, where fishermen and community were actively involved in all design phases, ensuring that the games were culturally relevant and suited to the socioeconomic circumstances of the participants. The games were developed through participatory dynamics focused on knowledge dialogue and community integration.

Tabla 1. Resultados de la Lluvia de Ideas, Cartografía Social y Estrategias para Identificar Barreras.

Table 1. Results of the brainstorming, social mapping, and strategies implemented to identify barriers

Herramientas/Tools	Ideas Planteadas/Proposed ideas	Estrategias Usadas para Identificar Barreras/ Strategies used to identify barriers
Lluvia de Ideas/ Brainstorming	1. Falta de conocimiento sobre la Ley 2268 y sus beneficios./Lack of knowledge about Law 2268 and its benefits	1. Discusión abierta en talleres para identificar el desconocimiento legal./ Open discussion in workshops to identify legal ignorance
	2. Necesidad de diseñar materiales educativos adaptados al contexto cultural local/Need to design educational materials adapted to the local cultural context	2. Creación de grupos focales para explorar barreras culturales y educativas./Creation of focus groups to explore cultural and educational barriers
	3. Importancia de involucrar a los jóvenes en la gestión de los recursos pesqueros./Importance of involving young people in the management of fishery resources	3. Aplicación de encuestas para identificar la falta de participación juvenil./Survey to identify the causes for the lack of youth participation
	4. Problemas de acceso a información relevante debido a barreras tecnológicas y de comunicación./Problems accessing relevant information due to technological and communication barriers	4. Observación directa de las limitaciones tecnológicas durante los talleres./Direct observation of technological limitations during the workshops
Cartografía Social/ Social cartography	1. Visualización de prácticas pesqueras tradicionales y su conexión con la sostenibilidad./ Visualization of traditional fishing practices and their connection to sustainability	1. Mapeo participativo de las actividades cotidianas y retos enfrentados por la comunidad./Participatory mapping of daily activities and challenges faced by the community
	2. Identificación de zonas críticas para la implementación de la Ley 2268./Identification of critical areas for the implementation of Law 2268	2. Discusión en grupos sobre los desafíos geográficos y ambientales para aplicar la ley./Group discussion on geographical and environmental challenges for law enforcement
	3. Percepción de los pescadores sobre su rol en la gestión de recursos pesqueros./Perception of fishermen about their role in the management of fishery resources	3. Recolección de testimonios para entender las percepciones y barreras culturales./Collection of testimonies to understand perceptions and cultural barriers

Herramientas/Tools	Ideas Planteadas/Proposed ideas	Estrategias Usadas para Identificar Barreras/ Strategies used to identify barriers
Estrategias/Strategies	1. Talleres de sensibilización y formación sobre la Ley 2268./ Awareness and training workshops on Law 2268	1. Uso de la IAP y el DCP para asegurar un proceso inclusivo y participativo/Use of PAR and HDC to ensure an inclusive and participatory process.
	2. Creación de prototipos lúdicos educativos para la enseñanza del marco legal./Creation of educational playful prototypes for teaching the legal framework	2. Evaluación de prototipos mediante retroalimentación continua de los participantes./Evaluation of prototypes through continuous feedback from participants

En la etapa inicial, se realizó un diagnóstico participativo utilizando herramientas como la cartografía social y la lluvia de ideas, contribuyendo a identificar barreras como el desconocimiento de la normativa y su lenguaje complejo. Durante la fase intermedia, los participantes co-crearon prototipos de juegos educativos diseñados para enseñar los aspectos clave de la Ley 2268, incorporando elementos culturales y tradiciones pesqueras. En la etapa final, los prototipos fueron socializados y evaluados colectivamente, ajustándose según las sugerencias de los participantes para optimizar su claridad y efectividad. Estas actividades fomentaron el aprendizaje interactivo, la apropiación del conocimiento y el fortalecimiento comunitario, vinculando la normativa con las experiencias y necesidades locales de los pescadores artesanales.

El análisis inicial de necesidades, efectuado en seis comunidades de pescadores artesanales, reveló un desconocimiento general en la comprensión de la Ley 2268. Este resultado se alcanzó mediante un diagnóstico participativo en Buenaventura y Tumaco, con la participación de actores diversos como jóvenes, adultos, líderes comunitarios, instituciones territoriales y el equipo de SocPro4Fish de Invemar. Se compararon los grupos observando el nivel de conocimiento previo sobre la ley, identificado a través de entrevistas y discusiones grupales, lo que evidenció brechas informativas notables entre las comunidades. Esta falta de entendimiento motivó la elección de un enfoque educativo lúdico para abordar la complejidad de la legislación. La co-creación de los prototipos realizados de manera participativa fue importante para garantizar que los contenidos fueran relevantes y comprensibles para los miembros de la comunidad, favoreciendo la apropiación del conocimiento en un entorno que estimulara el aprendizaje activo. El proceso de apropiación social del conocimiento sobre la Ley 2268 culminó con la creación de

In the initial stage, a participatory diagnosis was conducted using tools such as social mapping and brainstorming, which helped to identify barriers like the lack of knowledge about regulations and their complex language. During the intermediate phase, the participants co-created prototypes of educational games designed to teach the key aspects of Law 2268 while incorporating cultural elements and fishing traditions. In the final stage, the prototypes were shared and collectively evaluated, adjusting them according to the participants' suggestions in order to optimize their clarity and effectiveness. These activities promoted interactive learning, the appropriation of knowledge, and community strengthening, linking regulations with the local experiences and needs of artisanal fishermen.

The initial needs analysis, conducted in six artisanal fishing communities, revealed a general lack of understanding of Law 2268. This was found through a participatory diagnosis in Buenaventura and Tumaco that included a diversity of actors such as young people, adults, community leaders, territorial institutions, and INVEMAR's SocPro4Fish team. The groups were compared in terms of their prior knowledge about the law, identified through interviews and group discussions, which evidenced notable informational gaps. This lack of understanding motivated the choice of a playful educational approach to address the complexity of the legislation. The participatory co-creation of the prototypes was important to ensure that the content was relevant and understandable for community members, promoting the appropriation of knowledge in an environment that stimulated active learning. The SAK with regard to Law 2268 culminated with the creation of 14 prototypes of educational games which were collectively designed by the six artisanal fishing communities. These games represent an innovative pedagogical tool and reflect the dialogue of knowledge between artisanal fishermen,

14 prototipos de juegos educativos, diseñados colectivamente por las seis comunidades pesqueras artesanales. Estos juegos representan una herramienta pedagógica innovadora y reflejan el diálogo de saberes entre los pescadores artesanales, líderes comunitarios y el equipo investigador.

A través de metodologías participativas como la IAP y el DCP los participantes lograron traducir conceptos legales complejos en dinámicas lúdicas que integran su identidad cultural, prácticas ancestrales y necesidades locales. Cada prototipo (Figura 2) evidencia cómo las comunidades se apropiaron de la normativa, transformándola en un recurso accesible y significativo para su vida cotidiana. Así, los juegos no solo son el resultado de este proceso, sino que además constituyen una estrategia efectiva para fortalecer la cohesión comunitaria y promover la sostenibilidad de la pesca artesanal en el Pacífico colombiano.

community leaders, and the research team.

Through participatory methodologies such as PAR and HCD, the participants managed to translate complex legal concepts into playful dynamics that integrate their cultural identity, ancestral practices, and local needs. Each prototype (Figure 2) demonstrates how the communities have embraced the regulations, transforming them into an accessible and meaningful resource for their daily lives. The games are not only the result of this process but also constitute an effective strategy to strengthen community cohesion and promote the sustainability of artisanal fishing in the Colombian Pacific.

The following subsections discuss the prototypes developed in this study, which were classified into three thematic lines that reflect complementary approaches in the social appropriation

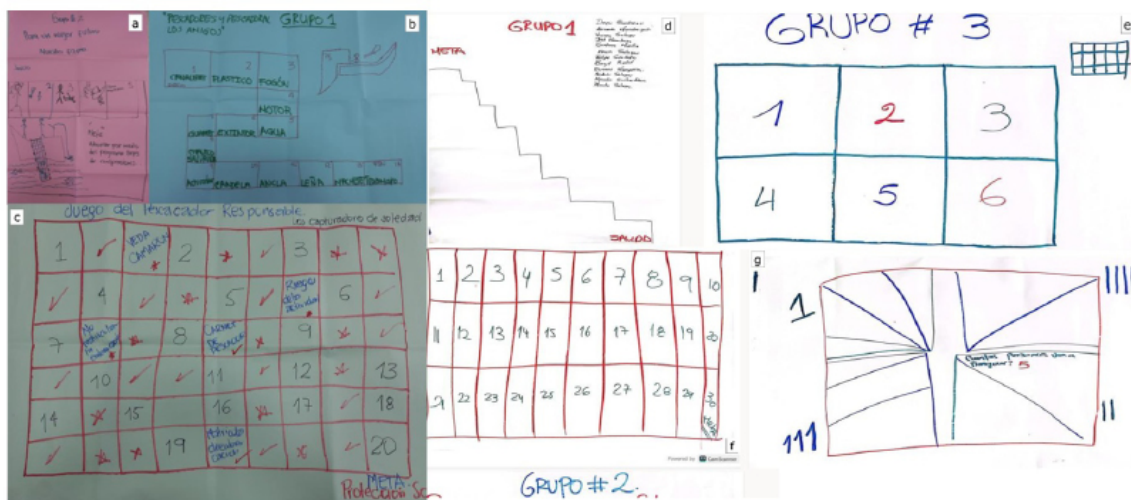


Figura 2. Representación gráfica de los prototipos lúdicos. (a) "Navegando por el mar de leyes: los marineros" (b) "Escalera pesquera: navegando hacia la sostenibilidad" (c) "Guardianes del manglar: el juego del pescador responsable" (d) "Mar de leyes: navegando la escalera 2268" (e) "Damas pesqueras del Pacífico" (f) "Tablero numérico hacia la meta" (g) "Redes de saber: pescando conocimientos".

Figure 2. Graphical representation of the didactic prototypes: (a) Navigating the Sea of Laws: The Sailors, (b) Fishing Ladder: Navigating towards Sustainability, (c) Guardians of the Mangrove: The Responsible Fisherman's Game, (d) Sea of Laws: Navigating Staircase 2268, (e) Fishing Ladies of the Pacific, (f) Numerical Board towards the Goal, (g) Networks of Knowledge: Fishing for Insights

A continuación, se destacan los prototipos desarrollados en este estudio, clasificados en tres líneas temáticas que reflejan enfoques complementarios en el proceso de apropiación social del conocimiento jurídico. La primera línea reúne los juegos enfocados en la comprensión de derechos y obligaciones, los cuales reflejan un aprendizaje interactivo y una internalización del marco normativo. La segunda línea compila los prototipos en torno a temáticas de sostenibilidad, gestión de recursos y

of legal knowledge. The first line includes games focused on understanding rights and obligations, involving interactive learning and an internalization of the regulatory framework. The second line compiles the prototypes centered on sustainability,

protección ambiental, destacando la importancia de las prácticas responsables en la pesca artesanal. Finalmente, la tercera línea integra juegos orientados al empoderamiento comunitario, la reflexión colectiva y la participación, reforzando la capacidad de gestión de las comunidades pesqueras. Esta clasificación evidencia la diversidad temática abordada por los pescadores, en las que se articulan el conocimiento tradicional, los conceptos jurídicos y la participación comunitaria como ejes transversales de la apropiación social de una norma específica (Tabla 2).

Prototipos que fortalecieron la comprensión de derechos y obligaciones jurídicas

Estos juegos estuvieron orientados a facilitar la asimilación de conceptos legales, inmersos en el marco normativo de la Ley 2268 y sus implicaciones prácticas para los pescadores artesanales. La dinámica se centró en un aprendizaje interactivo que condujo a que los participantes interiorizaran sus derechos y deberes, robustecieron su conocimiento jurídico desde una perspectiva lúdica y participativa.

- *Mar de leyes: navegando la escalera 2268*. Fomentó la apropiación de derechos y obligaciones mediante la interacción competitiva y la reflexión colectiva.
- *Tablero numérico hacia la meta*. Facilitó la comprensión de principios jurídicos a través de una dinámica de competencia que estimuló la reflexión.
- *La cebra: cruzando las aguas de la Ley 2268*. Promovió la incorporación de conceptos legales complejos mediante el juego, incentivando la participación y el entendimiento de la protección social.
- *Navegando por el mar de leyes: los marinos*. Profundizó la comprensión de la Ley 2268, promoviendo la cooperación en la gestión sostenible de los recursos pesqueros.
- *La culebra: navegando las aguas de la Ley 2268*. Exploró el conocimiento jurídico a través de preguntas específicas, enfocándose en los derechos y las obligaciones relacionadas con la protección social.

resource management, and environmental protection, highlighting the importance of responsible practices in artisanal fishing. Finally, the third line corresponds to games aimed at community empowerment, collective reflection, and participation, strengthening the management capacity of fishing communities. This classification highlights the thematic diversity addressed by the fishermen, wherein traditional knowledge, legal concepts, and community participation are articulated as cross-cutting axes of the social appropriation of a specific norm (Table 2).

Prototypes that strengthened the understanding of legal rights and obligations

These games were aimed at facilitating the assimilation of the legal concepts embedded within the regulatory framework of Law 2268 and its practical implications for artisanal fishermen. The dynamics strove towards an interactive learning experience that led participants to internalize their rights and duties, strengthening their legal knowledge from a playful and participatory perspective.

- *Sea of Laws: Navigating Staircase 2268* promoted the appropriation of rights and obligations through competitive interaction and collective reflection.
- *Numerical Board towards the Goal* facilitated the understanding of legal principles through a competitive dynamic that stimulated reflection.
- *The Zebra: Crossing the Waters of Law 2268* promoted the incorporation of complex legal concepts through play, encouraging participation and the understanding of social protection.
- *Navigating the Sea of Laws: The Sailors* deepened the understanding of Law 2268, promoting cooperation in the sustainable management of fishery resources.
- *The Snake: Navigating the Waters of Law 2268* explored legal knowledge through specific questions, focusing on rights and obligations related to social protection.

Prototipos que impulsaron la sostenibilidad, la gestión de recursos y la protección ambiental

Estos juegos incentivaron la sensibilización sobre la pesca sostenible, la conservación del recurso pesquero y la responsabilidad ambiental. A través de dinámicas lúdicas, consolidaron el compromiso ambiental de los participantes y estimulando el conocimiento de prácticas sostenibles alineadas con la protección de los ecosistemas marinos y el manejo responsable de los recursos pesqueros.

- *Guardianes del manglar: el juego del pescador responsable.* Animó la cohesión comunitaria y la retroalimentación de conceptos como responsabilidad socioambiental.
- *Escalera pesquera: navegando hacia la sostenibilidad.* Sensibilizó sobre las prácticas sostenibles de pesca y la preservación del patrimonio ambiental.
- *Damas pesqueras del Pacífico.* Promovió la reflexión estratégica sobre sostenibilidad, protección social y fortalecimiento jurídico en el contexto de la pesca artesanal.
- *Gualajo: una faena de pesca artesanal.* Reforzó los conceptos la cooperación comunitaria, la toma de decisiones informadas y la gestión sostenible de los recursos pesqueros.

Prototipos que potenciaron el empoderamiento comunitario, la reflexión colectiva y la participación

Estos juegos avivaron el empoderamiento comunitario al fomentar la participación, la reflexión colectiva y el desarrollo de estrategias adaptativas frente a los desafíos reales del sector pesquero. Las dinámicas lúdicas fortalecieron el diálogo, estimularon la creatividad y ofrecieron herramientas para apoyar a los pescadores en el desarrollo de capacidades que les permitirán tomar decisiones informadas, contribuyendo así al fortalecimiento de la gestión comunitaria.

- *Redes de saber: pescando conocimientos.* Proporcionó un espacio de aprendizaje orientado a fomentar el acceso al conocimiento, incentivando el compañerismo y promoviendo la comprensión de una norma específica.
- *Rumbo a BEPS: un viaje hacia la seguridad social.*

Prototypes that promoted sustainability, resource management, and environmental protection

These games encouraged awareness about sustainable fishing, the conservation of fishery resources, and environmental responsibility. Through playful dynamics, they consolidated the participants' environmental commitment and stimulated the knowledge of sustainable practices aligned with the protection of marine ecosystems and the responsible management of fishing resources.

- *Guardians of the Mangrove: The Responsible Fisherman's Game* encouraged community cohesion and feedback regarding concepts such as socio-environmental responsibility.
- *Fishing Ladder: Navigating Towards Sustainability* raised awareness about sustainable fishing practices and the preservation of environmental heritage.
- *Fishing Ladies of the Pacific* promoted strategic reflection on sustainability, social protection, and legal strengthening in the context of artisanal fishing.
- *GUALAJO: An Artisanal Fishing Task* reinforced the concepts of *community cooperation, informed decision-making, and sustainable management of fishery resources.*

Prototypes that enhanced community empowerment, collective reflection, and participation.

These games sparked community empowerment by encouraging participation, collective reflection, and the development of adaptive strategies in response to the real challenges of the fishing sector. Playful dynamics strengthened dialogue, stimulated creativity, and offered tools to support fishermen in developing skills that will allow them to make informed decisions, thus contributing to the strengthening of community management.

- *Networks of Knowledge: Fishing for Insights* provided a learning space aimed at fostering access to knowledge, encouraging camaraderie, and promoting the understanding of a specific norm.
- *Destination BEPS* was a journey towards social security. It offered tools to raise awareness about the importance of social protection and financial planning

Ofreció herramientas para sensibilizar sobre la importancia de la protección social y la planificación financiera como elementos clave para el bienestar futuro de las comunidades pesqueras.

Tabla 2. Resumen de la descripción de los prototipos elaborados.

Table 2. Summary of the prototypes developed

Nombre/Name	Descripción/Description	Objetivos/Objectives	Resultados/Results
Mar de leyes: navegando la escalera 2268/ <i>Sea of Laws: Navigating staircase 2268</i>	Un juego basado en una estructura de escalera, donde los pescadores avanzan según acierten en preguntas sobre la Ley 2268 de 2022./A game based on a ladder structure, where the fishermen advance with every correct answer to questions about Law 2268 of 2022.	Llegar al final de la escalera respondiendo correctamente preguntas legales./To reach the end of the staircase by correctly answering legal questions.	Este juego promovió la competitividad sana y ayudó a reforzar los conocimientos adquiridos de manera interactiva./This game promoted healthy competitiveness and helped to reinforce the knowledge acquired in an interactive way.
Tablero numérico hacia la meta/ <i>Numerical board towards the goal</i>	Equipos de pescadores avanzaban por un tablero respondiendo preguntas sobre la ley. Los errores implicaban realizar actividades recreativas como “penitencias”/Teams of fishermen advance across a board, answering questions about the law. Any mistakes made require performing recreational activities as penalties.	Fomentar el aprendizaje colaborativo en torno a la Ley 2268 de 2022./To promote collaborative learning around Law 2268 of 2022	Las “penitencias” ayudaron a reforzar la cohesión grupal y a mantener la atención de los jugadores/The penalties helped to reinforce group cohesion and maintain the players’ attention.
Damas pesqueras del Pacífico/ <i>Fishing ladies of the Pacific</i>	Adaptación del clásico juego de damas, donde cada movimiento requiere responder correctamente preguntas sobre la pesca artesanal y la ley./An adaptation of the classic checkers game, where each move requires correctly answering questions about artisanal fishing and the law.	Capturar más fichas mientras se discuten conceptos clave de la Ley 2268 de 2022./To obtain more tokens while discussing key concepts of Law 2268 of 2022.	Se destacó por fomentar el pensamiento estratégico y el diálogo sobre la sostenibilidad en la pesca./This game stood out for promoting strategic thinking and dialogue regarding sustainability in fishing.

Redes de saber: pescando conocimientos/ <i>Networks of knowledge: Fishing for insights</i>	Un juego de preguntas y respuestas donde los pescadores avanzaban en un tablero al responder preguntas sobre la Ley 2268 de 2022/A question-and-answer game where fishermen advance on a board by answering questions about Law 2268 of 2022.	Crear “redes” de conocimiento y avanzar hacia una comprensión profunda de la ley/ To create networks of knowledge and move towards a deep understanding of the law	Esta dinámica fomentó el aprendizaje en grupo y la autoevaluación del conocimiento./These dynamics encouraged group learning and self-assessment of knowledge.
Gualajó: una faena de pesca artesanal/ <i>GUALAJÓ: An artisanal fishing task</i>	Este juego simula una jornada de pesca artesanal en la costa del Pacífico colombiano. Los jugadores deben recolectar recursos mientras navegan por diversos desafíos relacionados con la sostenibilidad y las regulaciones pesqueras establecidas por la Ley 2268 de 2022./This game simulates a day of artisanal fishing on the Colombian Pacific coast. Players must collect resources while navigating various challenges related to sustainability and the fishing regulations established by Law 2268 of 2022.	Recolectar la mayor cantidad de recursos sin infringir las leyes pesqueras./ To collect the largest amount of resources without violating fishing laws.	Este prototipo generó una alta interacción entre los participantes y permitió comprender cómo aplicar los principios de la Ley 2268 de 2022 en la pesca diaria./This prototype generated a high level of interaction between the participants and allowed them to understand how to apply the principles of Law 2268 of 2022 in their everyday fishing activities.
Navegando por el mar de leyes: los marinos/ <i>Navigating the sea of laws: The sailors</i>	Un juego donde los participantes asumen el rol de marinos que deben navegar por las aguas del Pacífico cumpliendo con las regulaciones de la Ley 2268 de 2022. El juego está lleno de decisiones estratégicas relacionadas con el manejo de recursos y el respeto a los periodos de veda./A game where participants take on the role of sailors who must navigate the waters of the Pacific while complying with the regulations of Law 2268 of 2022. The game is full of strategic decisions related to resource management and ban seasons.	Llegar al final del tablero habiendo asegurado el máximo de beneficios de seguridad social./ To reach the end of the board after securing the most social security benefits.	El juego sirvió para visualizar las consecuencias de tomar decisiones incorrectas, sensibilizando a los pescadores sobre la importancia de respetar la legislación./The game helped to visualize the consequences of making incorrect decisions, raising awareness among fishermen about the importance of respecting the law.

La cebra: cruzando las aguas de la Ley 2268/<i>The zebra: Crossing the waters of law 2268</i>	Similar al popular juego de la “Cebra”, pero adaptado para las normativas pesqueras. Los participantes deben cruzar el “río” respondiendo preguntas sobre las disposiciones legales, navegando entre casillas que representan oportunidades o retos./Similar to the popular game called Cebra” but adapted for fishing regulations. Participants must cross a river by answering questions about legal provisions, navigating between squares that represent opportunities or challenges.	Ser el primero en cruzar el “río” sin caer en las penalizaciones./To be the first to cross the “river” without incurring penalties.	Promovió el aprendizaje dinámico y rápido, con énfasis en los derechos de los pescadores y las sanciones en caso de incumplimiento./This game promoted dynamic and rapid learning, with an emphasis on the rights of fishermen and the penalties incurred in case of non-compliance.
Escalera pesquera: navegando hacia la sostenibilidad/ <i>Fishing ladder: Navigating towards sustainability</i>	Este prototipo representa la escalera hacia el éxito en la pesca sostenible. Los jugadores avanzan a través de casillas que representan buenas prácticas de pesca y preguntas clave sobre los mecanismos de protección social de la Ley 2268 de 2022/This prototype represents the staircase to success in sustainable fishing. The players advance through spaces that represent good fishing practices and key questions about the social protection mechanisms of Law 2268 of 2022.	Llegar a la cima de la escalera entendiendo y respetando las normativas pesqueras./To reach the top of the ladder, understanding and respecting fishing regulations.	Los participantes destacaron que el juego les permitió comprender mejor las sanciones y sus derechos en el marco legal, reforzando el respeto por la sostenibilidad./The participants highlighted that the game allowed them to better understand the sanctions and their rights within the legal framework, reinforcing their respect for sustainability.
Rumbo a BEPS: un viaje hacia la seguridad social/ <i>Destination BEPS: A journey towards social security</i>	En este prototipo, los jugadores deben avanzar en su carrera hacia el programa BEPS (Beneficios Económicos Periódicos), enfrentando preguntas y desafíos sobre los beneficios de seguridad social establecidos por la Ley 2268 de 2022/In this prototype, players must advance in their career towards the BEPS program (Periodic Economic Benefits), facing questions and challenges about the social security benefits established by Law 2268 of 2022.	Llegar al final del tablero habiendo asegurado el máximo de beneficios de seguridad social./To reach the end of the board after securing the most social security benefits.	Se demostró una mejor comprensión sobre los derechos de seguridad social de los pescadores, especialmente con relación a los períodos de inactividad./The fishermen demonstrated a better understanding of their social security rights, especially in relation to periods of inactivity.

Guardianes del manglar: el juego del pescador responsable/ <i>Guardians of the mangrove: The responsible fisherman's game</i>	Este juego se enfoca en la protección del manglar y la pesca sostenible. Los jugadores, como “guardianes del manglar”, deben tomar decisiones sobre cómo pescar sin dañar el ecosistema y respetando las normativas ambientales/This game focuses on the protection of the mangrove and sustainable fishing. The players, as guardians of the mangrove, must make decisions on how to fish without harming the ecosystem while complying environmental regulations.	Ser el pescador más responsable y con mayores conocimientos sobre la protección del manglar y el cumplimiento de la ley./To be the most responsible fisherman and acquire great knowledge about mangrove protection and compliance with the law.	A través del juego, los participantes entendieron la importancia de los recursos naturales y cómo la Ley 2268 de 2022 protege tanto los recursos como los derechos de los pescadores./ Through the game, the participants understood the importance of natural resources and how Law 2268 of 2022 protects both the resources and the rights of fishermen.
El Triki: navegando desafíos pesqueros/ <i>Triki: Navigating fishing challenges</i>	Basado en el clásico juego de tres en raya (o “triki”), los jugadores deben formar una fila contestando correctamente preguntas sobre las normativas pesqueras/Based on the classic game of tic-tac-toe, or triki, players must form a line by correctly answering questions about fishing regulations.	Formar una fila ganadora mientras se aprende sobre las normativas pesqueras./To form a winning line while learning about fishing regulations.	El formato simple pero competitivo permitió que los participantes se involucraran activamente, motivándolos a aprender rápidamente./The simple yet competitive format allowed for active engagement by the participants, motivating them to learn quickly.
Pachacajón: la travesía de los magníficos pescadores/ <i>Pachacajón: The journey of the magnificent fishermen</i>	Este juego de mesa desafía a los pescadores a completar una serie de desafíos relacionados con la pesca y las normativas de la Ley 2268 de 2022. Cada jugador representa un “pachacajón” (una canoa de pesca artesanal)./This board game challenges fishermen to complete a series of tasks related to fishing and the regulations of Law 2268 of 2022. Each player represents a pachacajón (an artisanal fishing canoe).	Completar la travesía sin infringir ninguna normativa pesquera./To complete the journey without violating any fishing regulations.	Este juego fue particularmente útil para enseñar sobre la importancia de la formalización de la pesca y la correcta declaración de capturas./This game was particularly useful for teaching about the importance of formalizing fishing and the correct reporting of catches.

La recolecta marina: desafíos y estrategias/ <i>The marine harvest: challenges and strategies</i>	Los jugadores recolectan recursos del mar mientras enfrentan preguntas sobre la Ley 2268 de 2022. La clave está en balancear la cantidad de recursos recolectados con las normativas que protegen los ecosistemas marinos/The players collect resources from the sea while facing questions about Law 2268 of 2022. The key is to balance the amount of resources collected with the regulations that protect marine ecosystems.	Obtener la mayor cantidad de recursos sin infringir la ley./ To obtain the largest amount of resources without breaking the law.	Los jugadores aprendieron a equilibrar la explotación de los recursos naturales con la sostenibilidad y el cumplimiento legal./ The players learned to balance the exploitation of natural resources with sustainability and compliance with regulations.
La culebra: navegando las aguas de la Ley 2268/ <i>The snake: navigating the waters of law 2268</i>	Un juego que simula el clásico “Serpientes y Escaleras”, donde los pescadores avanzan dependiendo de su conocimiento sobre la ley. Responder incorrectamente puede hacerlos retroceder al inicio./A game that simulates the classic snakes and ladders game, where the fishermen advance depending on their knowledge of the law. Answering incorrectly can send them back to the beginning of the board.	Llegar al final del tablero aprendiendo sobre los mecanismos de protección social./To reach the end of the board and learn about social protection mechanisms.	Este juego fue muy efectivo para reforzar el aprendizaje sobre las sanciones y los deberes de los pescadores en el marco legal./This game was very effective in reinforcing learning about the sanctions incurred by and the duties of fishermen within the legal framework.

- *El Triki: navegando desafíos pesqueros.* Facilitó espacios de reflexión colectiva y diálogo constructivo, propiciando un análisis compartido sobre los desafíos que enfrenta la pesca artesanal.
- *Pachacajón: la travesía de los magníficos pescadores.* Generó oportunidades para fomentar la participación, el debate y la construcción de estrategias que potencien la gestión de los recursos pesqueros.
- *La recolecta marina: desafíos y estrategias.* Brindó herramientas que contribuyen al empoderamiento comunitario a través de la reflexión colectiva y el fortalecimiento de la cooperación frente a las normas pesqueras vigentes.

as key elements for the future well-being of fishing communities.

- *El Triki: Navigating Fishing Challenges* facilitated spaces for collective reflection and constructive dialogue, fostering a shared analysis of the challenges faced by artisanal fishing.
- *Pachacajón: the Journey of the Magnificent Fishermen* created opportunities to promote participation, debate, and the development of strategies to enhance the management of fishery resources.
- *The Marine Harvest: Challenges and Strategies* provided tools that contributed to community empowerment through collective reflection and the strengthening of cooperation in relation to current fishing regulations.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio revelan que la creación de juegos didácticos en comunidades rurales dispersas constituye una estrategia innovadora y eficaz para la apropiación social de la Ley

DISCUSSION

This study revealed that the creation of educational games in dispersed rural communities constitutes an innovative and

2268. La implementación de este enfoque lúdico no solo facilitó el acceso a la información legal, sino que también incentivó una mayor participación y empoderamiento de los pescadores artesanales, generando una comprensión más profunda de sus derechos y deberes. En la literatura académica, diversos estudios han evidenciado que las comunidades rurales enfrentan barreras significativas para acceder y comprender la normatividad debido a bajos niveles de alfabetización y al limitado acceso a recursos informativos.

Por ejemplo, [Buendía \(2018\)](#) registra que estas dificultades generan una brecha en la comunicación jurídica, mientras que [Zariski \(2014\)](#) destaca la importancia de mejorar la alfabetización legal en entornos rurales. Además, investigaciones realizadas por [Pruitt y Showman \(2014\)](#) y [Newman y Gordon \(2023\)](#) señalan que los métodos tradicionales de enseñanza no logran superar las barreras culturales y comunicativas presentes en estos contextos. En consonancia, los hallazgos demuestran que un enfoque lúdico y experiencial puede contrarrestar las barreras asociadas al lenguaje jurídico complejo, haciendo posible la asimilación de principios legales y su aplicación en situaciones cotidianas. Esta observación guarda relación con lo expuesto por [Carroll \(2017\)](#), quien, desde una metodología participativa, también evidenció mejoras en la alfabetización jurídica. Sin embargo, nuestro enfoque se basa en prácticas propias de la pesca artesanal, lo que permite adaptar el contenido jurídico a la realidad cultural y productiva de la comunidad.

La metodología adoptada en este estudio se fundamenta en la [teoría del aprendizaje experiencial de Kolb \(1984\)](#), que sostiene que la experiencia directa y la reflexión son esenciales para la adquisición y retención del conocimiento. Esta investigación evidenció que las aplicaciones de actividades lúdicas participativas tienen un efecto positivo en la retención de los conceptos legales en poblaciones rurales. No obstante, para robustecer aún más el respaldo metodológico, es importante considerar trabajos recientes como los de [Vázquez y Azahuanche \(2020\)](#) y [Venegas et al. \(2021\)](#), los cuales presentan metodologías integradas que combinan enfoques cualitativos y cuantitativos para evaluar la eficacia de estrategias de aprendizaje en entornos similares. La incorporación de estos enfoques mixtos podría enriquecer futuras investigaciones, proporcionando un respaldo empírico más sólido a la efectividad de los métodos lúdicos en la apropiación social del conocimiento jurídico. Asimismo, este estudio

effective strategy for the social appropriation of Law 2268. The implementation of this playful approach not only facilitated access to legal information but also encouraged greater participation and empowerment among artisanal fishermen, generating a deeper understanding of their rights and duties. In the academic literature, various studies have shown that rural communities face significant barriers to accessing and understanding regulations due to low literacy levels and limited access to informational resources.

For example, [Buendía \(2018\)](#) reports that these difficulties create a gap in legal communication, while [Zariski \(2014\)](#) highlights the importance of improving legal literacy in rural settings. Moreover, the works by [Pruitt and Showman \(2014\)](#) and [Newman and Gordon \(2023\)](#) indicate that traditional teaching methods fail to overcome the cultural and communicative barriers present in these contexts. In line with this, our findings demonstrate that a playful and experiential approach can counteract the barriers associated with complex legal language, making it possible to assimilate legal principles and apply them in everyday situations. This observation is related to that stated by [Carroll \(2017\)](#), who evidenced improvements in legal literacy when implementing a participatory methodology. However, our approach was based on practices typical of artisanal fishing, which allowed adapting the legal content to the cultural and productive reality of the community.

The methodology adopted in this study was based on [Kolb's experiential learning theory \(1984\)](#), which argues that direct experience and reflection are essential for the acquisition and retention of knowledge. This research demonstrated that the application of participatory recreational activities has a positive effect on the retention of legal concepts in rural populations. However, to further strengthen the methodological support, it is important to consider recent works such as those by [Vázquez and Azahuanche \(2020\)](#) and [Venegas et al. \(2021\)](#), which present integrated methodologies that combine qualitative and quantitative approaches in order to evaluate the effectiveness of learning strategies in similar environments. The incorporation of these mixed approaches could enrich future research, providing a more solid empirical support for didactic methods aimed at the social appropriation of legal knowledge. Likewise, this study incorporated a cultural dimension that reinforces the transmission of knowledge, in line with [Bourdieu's \(1991\)](#) theories on the

incorpora una dimensión cultural que refuerza la transmisión de saberes, en línea con las teorías de Bourdieu (1991) sobre el poder simbólico del lenguaje. La adaptación de los juegos a las realidades socioculturales de las comunidades pesqueras hizo posible que el aprendizaje se vinculara estrechamente con la identidad local, contribuyendo a la preservación de tradiciones y a la construcción de una ciudadanía más informada.

En relación con la competencia comunicativa, el uso de juegos didácticos se mostró como un mediador cultural eficaz, ya que favoreció la comunicación en contextos con bajos índices de alfabetización. La integración de estrategias interactivas y participativas, respaldada por las ideas de Hymes (1972) sobre el papel del lenguaje en contextos socioculturales, y evidenciada en estudios recientes (Venegas *et al.*, 2021), hizo posible superar barreras comunicativas y estimular una comprensión más accesible de la normatividad. De igual forma, la implementación de herramientas participativas como la lluvia de ideas y la cartografía social resultó clave para identificar y analizar las barreras en la apropiación de la Ley 2268. Este proceso, que incluyó la comparación entre grupos a través de conversaciones espontáneas y discusiones, condujo a diseñar estrategias pedagógicas adaptadas a los contextos específicos de Buenaventura y Tumaco, en línea con lo propuesto por Pérez *et al.* (2019).

Finalmente, la implementación de herramientas participativas, como la lluvia de ideas y la cartografía social, coincide con lo propuesto por Pérez *et al.* (2019), resaltando la importancia de estrategias adaptadas a contextos locales. Estudios como los de Barsky (1991) y Schiller y Minter (2005) señalan que metodologías educativas contextualizadas facilitan la apropiación del conocimiento legal en comunidades rurales.

Retos

En la ejecución de los talleres sobre la Ley 2268 en las comunidades rurales de Tumaco y Buenaventura, surgieron diversos desafíos que dificultaron la asimilación social del saber. Uno de los más significativos fue la ignorancia generalizada de la ley entre los pescadores artesanales. La mayoría carecía de conocimiento previo sobre la normativa y sus ventajas, generando un vacío que debía cubrirse desde el comienzo del proceso. Esta ignorancia inicial exigió un esfuerzo extra para asegurar que los pescadores comprendieran los conceptos

symbolic power of language. The adaptation of games to the sociocultural realities of fishing communities made it possible for learning to be closely linked to local identity, contributing to the preservation of traditions and the construction of a more informed citizenship.

Regarding communicative competence, the use of educational games proved to be an effective cultural mediator, as it facilitated communication in contexts with low literacy levels. The integration of interactive and participatory strategies, supported by Hymes' (1972) ideas on the role of language in sociocultural contexts and evidenced in recent studies (Venegas *et al.*, 2021), made it possible to overcome communication barriers and stimulate a more accessible understanding of regulations. Similarly, the implementation of participatory tools such as brainstorming and social mapping was key to identifying and analyzing the barriers to the appropriation of Law 2268. This process, which included a comparison between groups through spontaneous conversations and discussions, led to designing pedagogical strategies adapted to the specific contexts of Buenaventura and Tumaco, in line with the proposals of Pérez *et al.* (2019).

Finally, the implementation of participatory tools such as brainstorming and social mapping aligns with Pérez *et al.* (2019), highlighting the importance of strategies adapted to local contexts. Studies such as those by Barsky (1991) and Schiller and Minter (2005) indicate that contextualized educational methodologies facilitate the appropriation of legal knowledge in rural communities.

Challenges

During the workshops on Law 2268 in the rural communities of Tumaco and Buenaventura, various challenges arose which hindered the SAK. One of the most significant was the widespread ignorance of the law among artisanal fishermen. Most of them lacked prior knowledge about the regulations and their advantages, creating a gap that needed to be filled from the beginning of the process. This initial ignorance required an extra effort to ensure that the fishermen understood the fundamental concepts and the importance of the regulations for their daily lives and their social security.

Other significant challenges were obstacles in accessing information. Rural communities face connectivity and

fundamentales y la importancia de la normativa para su vida cotidiana y su salvaguarda social.

Otros desafíos significativos, fueron los obstáculos para el acceso a la información. Las comunidades rurales enfrentan restricciones de conectividad e infraestructura, complicando el acceso a recursos educativos y materiales adecuados. La falta de acceso a internet, sumada a las restricciones físicas, dificultó implementar estrategias de información. Esto evidenció la necesidad de crear métodos alternativos, como materiales impresos y talleres presenciales, para distribuir la información eficazmente en la comunidad.

De este modo, la estructura técnica y formal de la ley representó un reto considerable. Los conceptos jurídicos complicados dificultaron la comprensión de la normativa para los pescadores, quienes en muchos casos no manejaban el vocabulario legal. A pesar de que los prototipos facilitaban el contenido, el equipo de facilitación tuvo que simplificar el lenguaje y emplear herramientas visuales accesibles para asegurar que todos comprendieran el conocimiento legal, respetando las variaciones en la alfabetización y cultura.

Por otro lado, algunas comunidades también mostraron resistencia a oficializar sus prácticas de pesca. Los pescadores temían que la ley amenazara su estilo de vida, generando desconfianza. Este desafío se superó mediante el diálogo y acciones que enfatizaban las ventajas a largo plazo de la legislación, como la salvaguarda de derechos y el acceso a protección social. Incluir a líderes comunitarios fue clave para fomentar la relevancia de la normativa.

En otras palabras, la sostenibilidad de estas iniciativas supuso un reto. Aunque los talleres concienciaron a numerosos pescadores, la continuidad del aprendizaje tras las actividades fue una inquietud. Las comunidades, al lidiar con problemas socioeconómicos inmediatos, suelen anteponer otras necesidades a la educación jurídica. Por ello, se diseñaron tácticas para que los pescadores pudieran replicar las actividades y se fortaleció a los líderes comunitarios para difundir el conocimiento y fomentar la implementación de la Ley 2268.

COMENTARIOS FINALES

La puesta en marcha de actividades lúdicas como táctica de

infraestructura restricciones, which complicate access to educational resources and adequate materials. The lack of Internet access, combined with physical restrictions, made it difficult to implement information strategies. This highlighted the need to create alternative methods, such as printed materials and in-person workshops, in order to effectively distribute information in the community.

Thus, the technical and formal structure of the law represented a considerable challenge. Complicated legal concepts made it difficult for the fishermen to understand the regulations, since, in many cases, they had no grasp of the legal vocabulary. Despite the fact that the prototypes made the content easier to assimilate, the team had to simplify the language and use accessible visual tools to ensure that everyone understood the legal knowledge while considering variations arising from literacy levels and cultural traits.

On the other hand, some communities showed resistance to formalizing their fishing practices. The fishermen, showing clear signs of distrust, feared that the law would threaten their way of life. This challenge was overcome through dialogue and actions that emphasized the long-term advantages of the legislation, such as safeguarding rights and access to social protection. Including community leaders was key to promoting the relevance of the regulations.

In other words, the sustainability of these initiatives posed a challenge. Although the workshops raised awareness among numerous fishermen, the continuity of learning after the activities was a concern. Communities, when dealing with immediate socioeconomic problems, often prioritize other needs over legal education. Therefore, tactics were designed so that the fishermen could replicate the activities, and community leaders were strengthened to disseminate knowledge and promote the implementation of Law 2268.

FINAL REMARKS

The implementation of didactic activities, as a strategy for the social appropriation of Law 2268 of 2022 in the dispersed rural fishing communities of Tumaco and Buenaventura, proved to be an effective method to overcome obstacles in understanding and accessing information. Through the joint development of didactic prototypes with the local communities, the understanding

asimilación social de la Ley 2268 de 2022 en las comunidades rurales pesqueras dispersas de Tumaco y Buenaventura se evidenció como un método efectivo para vencer los obstáculos de entendimiento y acceso a la información. Mediante la elaboración conjunta de prototipos didácticos con las comunidades locales, se consiguió simplificar la comprensión de conceptos jurídicos complejos, fomentando una interacción y participación activa de los pescadores artesanales en su proceso educativo. Esta técnica simplificó el contenido legal y facilitó que los participantes asimilaran los beneficios y obligaciones que la ley les otorga.

Los desafíos afrontados durante el proceso, como el desconocimiento inicial de la normativa, los obstáculos para obtener información y la resistencia al cambio, resaltan la relevancia de elaborar estrategias ajustadas a las circunstancias socioeconómicas y culturales de cada comunidad. El éxito del método lúdico radicó en su capacidad para incorporar conocimientos locales y aplicar estrategias participativas, lo cual hizo que el aprendizaje fuera pertinente y adaptado a las demandas de los pescadores artesanales. La implicación directa de los líderes comunitarios también resultó esencial para reanimar la confianza y asegurar la transmisión futura de los saberes adquiridos.

El intercambio de información y retroalimentación entre participantes ayudó a identificar las dinámicas lúdicas, lo que a su vez facilitó a los participantes una mejor comprensión de la Ley 2268. Si bien no se desarrollaron comparaciones sistemáticas con otros estudios, se observaron indicios de que este enfoque contribuyó a generar espacios de diálogo en torno a prácticas culturales asociadas a la pesca artesanal.

No obstante, uno de los retos más significativos es asegurar la continuidad de los esfuerzos de apropiación social tras concluir las actividades en persona. Es importante que los pescadores sigan empleando las herramientas recreativas para consolidar su entendimiento de la Ley 2268 y su implementación. Para conseguirlo, es necesario dotar a las comunidades de recursos extra y respaldo institucional, de manera que los avances obtenidos perduren en el tiempo y las dinámicas educativas puedan replicarse de forma autónoma.

En síntesis, este trabajo evidencia que el uso de técnicas lúdicas es una táctica alentadora para fomentar la asimilación social del saber en comunidades rurales dispersas. Adicionalmente,

of complex legal concepts was simplified, promoting the active interaction and participation of artisanal fishermen in their educational process. This technique simplified the legal content and made it easier for the participants to understand the benefits and obligations that the law grants them.

The challenges faced during the process, such as the initial lack of knowledge of the regulations, obstacles in obtaining information, and resistance to change, underscore the importance of developing strategies tailored to the socioeconomic and cultural circumstances of each community. The success of our playful method lay in its ability to incorporate local knowledge and apply participatory strategies, which made learning relevant and adapted to the demands of the artisanal fishermen. The direct involvement of community leaders was also essential to rebuilding trust and ensuring the future transmission of the acquired knowledge.

The exchange of information and feedback between participants facilitated the identification of recreational dynamics while enhancing the understanding of Law 2268. Although systematic comparisons against other studies were not conducted, there were indications that this approach contributed to creating spaces for dialogue around cultural practices associated with artisanal fishing.

However, one of the most significant challenges is ensuring the continuity of social appropriation efforts after in-person activities conclude. It is important for fishermen to continue using recreational tools to consolidate their understanding of Law 2268 and its implementation. To this effect, it is necessary to provide communities with extra resources and institutional support, so that the progress made endures over time and educational dynamics can be replicated autonomously.

In summary, this work demonstrates that the use of playful techniques is an encouraging tactic to promote the SAK in dispersed rural communities. Additionally, it emphasizes the importance of adjusting educational strategies to local environments, ensuring that communities actively engage in the learning process. Future studies could investigate the implementation of this method in other areas and laws, expanding its range and assessing its long-term influence on communities.

This experience should motivate the academic community to keep creating innovative educational strategies that meet the

enfatisa la relevancia de ajustar las estrategias educativas a los entornos locales, garantizando que las comunidades se involucren de manera activa en el proceso de aprendizaje. Estudios futuros podrían investigar la implementación de este método en otras áreas y leyes, expandiendo su rango y valorando su influencia a largo plazo en la vida de las comunidades.

El logro de esta experiencia motiva a continuar con la creación de estrategias educativas novedosas que se ajusten a las demandas particulares de las zonas rurales, garantizando los derechos y asegurando que las regulaciones, como la Ley 2268 de 2022, sean entendidas y puestas en práctica de forma eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado en el marco del proyecto Protección social para la pesca y la acuicultura (SocPro4Fish-II) en Colombia, el cual fue financiado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura por medio de la Carta de Acuerdo No. 355746.

specific demands of rural areas, guaranteeing the exercise of rights and ensuring that regulations such as Law 2268 of 2022 are understood and efficiently implemented.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted within the framework of the Social Protection for Fisheries and Aquaculture project (SocPro4Fish-II) in Colombia, which was funded by the Food and Agriculture Organization of the United Nations through Letter of Agreement No. 355746.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. (2019). *Caracterización, formalización y fortalecimiento asociativo de los pescadores artesanales marítimos del Caribe, Pacífico e Insular y pescadores artesanales continentales del área de influencia de Hidroituango en Colombia*. Bogotá: AUNAP y PNUD. p 299.
- Barsky, R.F. (1991). Language and symbolic power. *Modern Language Quarterly*, 52(4), pp 466-468. <https://doi.org/10.1215/00267929-52-4-466>
- Bourdieu, P. (1991). *Language and Symbolic Power*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Buendía, P. (2018). *Acceso a la justicia y necesidades jurídicas de las poblaciones rurales en Colombia*. Tesis de maestría. Universidad de los Andes. <hdl.handle.net/1992/34706>
- Buraschi, D., y Aguilar, M. (2019). Empoderamiento comunicacional: Una estrategia de intervención comunitaria para superar los límites de la sensibilización social. *Revista de Educación Social*. No. 29.
- Caillois, R. (2001). *Man, play, and games*. Illinois: University of Illinois Press.
- Canale, M., y Swain, M. (1980). *Theoretical bases of communicative approaches to second language teaching and testing*. Oxford: Applied Linguistics.
- Carroll, D. (2017). *Legal Deserts: A Multi-State Perspective on Rural Access to Justice*. Harvard Law & Policy Review, 11(1), pp 15-45.
- Chingaté Hernández, I. N., (2008). Democratización del conocimiento científico tecnológico en Colombia. *Papel Político*. 14(2), pp 393–408.
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structures*. 2nd ed. Scribd. Berlín: Mouton de Gruyter.
- Chomsky, N. (1999). *Aspectos de la teoría de la sintaxis*. Barcelona: Gedisa Editorial.
- Congreso de Colombia, (2022). *Por medio de la cual se expiden normas para garantizar beneficios sociales focalizados a los pescadores artesanales comerciales y de subsistencia* Ley N° 2268, 22 de agosto.
- Departamento Nacional de Estadísticas - DANE (2022). *Indicadores de necesidades básicas insatisfechas (NBI), según recientes agregaciones territoriales*. [online] Dane.gov.co. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>.
- Escobar, A. (2019). *Autonomía y diseño: La realización de lo comunal*. Popayán: Universidad del Cauca. <https://doi.org/10.2307/j.ctvpv50jd>.
- Flanagan, M. (2013). *Critical play: Radical game design*. Cambridge: MIT Press.
- Frissen, V. (2015). *Playful identities: The ludification of digital media cultures*. Amsterdam: Amsterdam University Press.
- Gumperz, J. (1994). *Discourse strategies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Huizinga, J. (1980). *Homo ludens: A study of the play-element in culture*. London : Routledge & Kegan Paul.
- Hymes, D. (1972). *On Communicative Competence*. London:

Penguin Books.

IDEO. (2015). *The field guide to human-centered design*. Canadá: IDEO.

IDEO. (2011). *Human-centered design: Toolkit*. Nueva York: IDEO.

Kolb, D. (1984). *Experimental learning: Experience as the source of learning and development*. New York: Prentice-Hall.

Latorre, A. (2010). *La investigación-acción: Conocer y cambiar la práctica educativa*. Barcelona: Graó.

Manzini, E. (2015). *Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation*. Cambridge: The MIT Press.

Marín, S. (2012). *Apropiación social del conocimiento: Una nueva dimensión de los archivos*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación - MinCiencias. (2021). *Política Pública de Apropiación Social del Conocimiento en el marco de la CTel*. Bogotá: MinCiencias.

Ministerio de Educación - MinEducación. (2022). *Cobertura de educación por municipio en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Educación. Recuperado de: <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/comparaciones>.

Newman, D. and Gordon, F., (2023). *Access to justice in rural communities: Global Perspectives*. London: Bloomsbury Publishing.

Pruitt, L. R. and Showman, A. (2014). Law stretched thin: access to justice in rural America. *South Dakota Law Review*, 59(3), pp 466-499.

Selvaraj, J.J., Guerrero, D., Cifuentes-Ossa, M.A and Guzmán-Alvis, A.I. (2022). The economic vulnerability of fishing households to climate change in the south Pacific region of Colombia. *Heliyon* 8(5) e09425 doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09425

Tapia, A., Melecio, Y. y Contreras, Z. (2017). *La lúdica como herramienta para el aprendizaje*. Tesis. Universidad Pontificia Bolivariana, Puerto Asís.

Taranilla, R. (2012). *La enseñanza de habilidades comunicativas para la práctica del derecho: La técnica narrativa en contextos judiciales*. Barcelona: Editorial Jurídica.

Tiersma, P. M. (1999). *Legal Language*. Chicago: University of Chicago Press.

Vásquez, G., y Azahuanche, M. A. P. (2020). Estrategias lúdicas para la comprensión de textos en estudiantes de educación primaria. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 11, e805. https://doi.org/10.33010/ie_rediech.v11i0.805

Venegas, G., Proaño, C., Castro, S., y Tello, G. (2021). Actividades lúdicas para el mejoramiento de la lectura comprensiva en estudiantes de educación básica. *Horizontes. Revista de Investigación en Ciencias de la Educación*, 5(18), pp 502-514. <https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v5i18.191>

Zariski, A. (2014). *Legal literacy: an introduction to legal studies*. Edmonton: Athabasca University Press.



NOTA / NOTE

Primer registro de la formación coralina de Bahía Honda, La Guajira, Colombia

First report of the coral formation of Bahía Honda, Guajira, Colombia

Raúl Navas-Camacho¹

✉ 0000-0002-6062-315X
raul.navas@invemar.org.co

Elizabeth Galeano-Galeano¹

✉ 0000-0003-0633-2949
elizabeth.galeano@invemar.org.co

Andrés Felipe Acosta-Chaparro¹

✉ 0000-0002-0618-5689
andres.acosta@invemar.org.co

Laura Sánchez-Valencia¹

✉ 0000-0002-1408-7050
laura.sanchez@invemar.org.co

Adriana Daza²

✉ 0000-0002-4022-4549
a.daza@corpoguajira.gov.co

1. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Calle 25 #2-55, El Rodadero, Santa Marta, Colombia.

2. Corporación Autónoma Regional de La Guajira, CORPOGUAJIRA.

*Autor de correspondencia/Corresponding Author

Recibido / Received: 04/03/2024

Aceptado / Accepted: 01/04/2025

Citación / Citation: Navas-Camacho, R.; Galeano-Galeano, E.; Acosta-Chaparro, A.F.; Sánchez-Valencia, L.; Daza, A. 2025. Bahía Honda, La Joya Coralina de la Península De La Guajira, Colombia. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2):161-170

RESUMEN

El descubrimiento de un arrecife coralino de borde previamente no registrado en Bahía Honda, Alta Guajira, Colombia, es presentado. Históricamente, Bahía Honda ha sido referenciada como un área sin formaciones coralinas a pesar de visitas previas de investigadores. Este descubrimiento ocurrió durante la caracterización de pastos marinos y manglares en las bahías de Hondita y Portete. Para describir su formación específica y estructural, se realizaron evaluaciones ecológicas rápidas mediante buceo libre. El arrecife está compuesto por dos segmentos: una formación coralina mixta de no más de 30 m de largo y una barrera de aproximadamente 1,8 km de *Acropora palmata*, que se extiende desde 0,5 hasta 4,0 m de profundidad. En esta barrera, se observaron corales de crecimiento masivo, principalmente de *Colpophyllia natans*, *Pseudodiploria strigosa* y *Siderastrea siderea*, distribuidos a lo largo del arrecife. Un total de 22 especies de coral fueron registradas. La formación de coral se determinó que estaba en buen estado de salud, siendo la única afectación observada la enfermedad de manchas oscuras en *S. siderea*. No se observaron otras enfermedades comúnmente asociadas con los arrecifes del Caribe colombiano. Adicionalmente, se realizó un registro preliminar de las especies de peces presentes en el arrecife, identificando 30 especies.

Palabras clave: *Acropora palmata*, Alta Guajira, Arrecife Coralino, Biodiversidad.

ABSTRACT

The discovery of a previously unregistered fringing coral reef in Bahía Honda, Alta Guajira, Colombia, is presented. Historically, Bahía Honda has been referenced as an area without coral formations despite previous visits from researchers. This discovery happened during the characterization of seagrasses and mangroves in Hondita and Portete Bays. To describe its specific and structural formation, rapid ecological assessments were carried out through free diving. The reef is composed of two segments: a mixed coral formation no more than 30 m long and a barrier of approximately 1.8 km of *Acropora palmata*, extending from 0.5 to 4.0 m deep. In this barrier, massive growth corals, mainly of *Colpophyllia natans*, *Pseudodiploria strigosa* and *Siderastrea siderea*, were observed distributed along the reef. A total of 22 species of coral were recorded. The coral formation was determined to be in good health, with the only observed affection being the dark spot disease in *S. siderea*. No other diseases commonly associated with the reefs of the Colombian Caribbean were observed. Additionally, a preliminary record of fish species present in the reef was made, identifying 30 species.

Key words: *Acropora palmata*, Alta Guajira, Coral reefs, Biodiversity.

INTRODUCCIÓN

La península de la Guajira constituye el extremo septentrional de Colombia y del subcontinente suramericano. Este territorio, de características semiáridas, presenta costas generalmente bajas, con planos arenosos y salinos, y una extensa plataforma continental marina. El desarrollo de andamios arrecifales en la región está limitado por diversos factores: la ausencia de sustratos suficientemente firmes que permitan el asentamiento de organismos sésiles; los vientos predominantes provenientes de oriente y nororiente, que transportan sedimentos arcillosos desde el continente, generando oleaje y mareas fuertes que ocasionan resuspensión y alta turbidez; y la influencia de un fenómeno de surgencia que enfría y enriquece las aguas superficiales de la Guajira (21 – 25°C) en los primeros meses del año (Díaz *et al.*, 2000).

Hasta ahora, la literatura había registrado la existencia de formaciones coralinas en la Guajira en el interior de las bahías de Portete (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003) y Tukakas, siendo la de Portete la más desarrollada y extensa (Prah y Erhardt, 1985; Solano, 1994; Díaz *et al.*, 2000). Estas formaciones se encuentran en fondos someros, a profundidades que no superan 5 m de profundidad (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003). En Bahía Hondita, se conocían praderas de pastos marinos y bosques de manglar, mientras que en Bahía Honda solo se había registrado una pequeña pradera de pastos marinos en su costado nororiental (Díaz *et al.*, 2003).

Bahía Honda (Figura 1), la más pequeña de las tres bahías presentes en la Alta Guajira, se ubica en las coordenadas 12° 21' 11.14" N, 71° 47' 0.4" O, entre Bahía Hondita, al norte, y bahía Portete, al sur. Se caracteriza por la ausencia de manglares, su baja elevación, limitada a unos pocos acantilados en el costado suroccidental, y una reducida población humana residente. En su costado occidental se encuentra, desde hace más de 20 años, el pecio de un buque carguero encallado cerca de la costa. Según los habitantes, la navegación desde ese punto hacia el extremo de la bahía, no es aconsejable debido a la presencia de rocas en aguas poco profundas, agitadas y muy turbias.

Durante una expedición realizada el 15 de agosto de 2022 a las bahías Hondita, Honda y Portete, en el marco del convenio GIZ-Invemar, investigadores de Invemar y funcionarias de Corpoguajira encontraron que la visibilidad en Bahía Honda

INTRODUCTION

The Guajira Peninsula is the northernmost point of Colombia and the South American subcontinent. This semi-arid territory has a generally low coast, with sandy and saline plains, and an extensive marine continental shelf. The development of reef terraces in the region is limited by various factors: the absence of sufficiently firm substrates to allow the settlement of sessile organisms; the predominant winds from the east and northeast, which transport clayey sediments from the continent, generating waves and strong tides that cause resuspension and high turbidity; and the influence of an upwelling phenomenon that cools and enriches the surface waters (21 – 25°C) in the first months of the year (Díaz *et al.*, 2000).

Until now, the literature had recorded the existence of coral formations in La Guajira in the bays of Portete (Garzón-Ferreira and Díaz, 2003) and Tukakas, with Portete being the most developed and extensive (Prah and Erhardt, 1985; Solano, 1994; Díaz *et al.*, 2000). These formations are found in shallow seabeds, at depths not exceeding 5 m (Garzón-Ferreira and Díaz, 2003). In Bahía Hondita, seagrass meadows and mangrove forests were known, while in Bahía Honda only a small seagrass meadow had been recorded on its northeastern side (Díaz *et al.*, 2003).

Bahía Honda (Figure 1), the smallest of the three bays in Alta Guajira, is located at coordinates 12° 21' 11.14" N, 71° 47' 0.4" W, between Hondita Bay to the north and Portete Bay to the south. It is characterized by the absence of mangroves, its low elevation, limited to a few cliffs on the southwestern side, and a small resident human population. On its western side, there is the wreck of a cargo ship that has been stranded near the coast for more than 20 years. According to the local communities, navigation from that point to the end of the bay is not advisable due to the presence of rocks in shallow, rough and very turbid waters.

During an expedition carried out on August 15, 2022 to the Hondita, Honda and Portete bays, in the framework of the GIZ-Invemar agreement, Invemar researchers and Corpoguajira officials found that visibility in Bahía Honda exceeded 5 m both horizontally and vertically. This made possible the observation of a coral reef never described before, on the eastern side of the ship wreck.

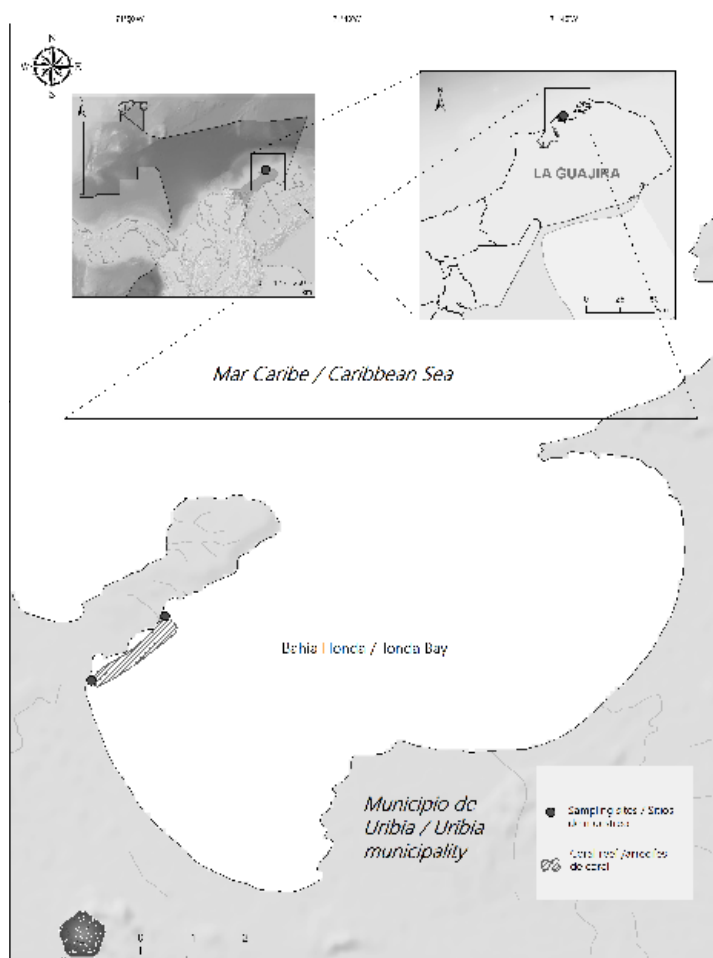


Figura 1. Ubicación geográfica de Bahía Honda, forma y localización del arrecife de corales mixtos y *Acropora palmata*. Elaborado por Laboratorio de Servicios de Investigación, Invermar.

Figure 1. Geographic location of Bahía Honda, shape and location of the mixed coral reef and *Acropora palmata*. Prepared by the Research Services Laboratory, Invermar.

superaba 5 m tanto horizontal como verticalmente. Esto permitió identificar, en el costado oriental del pecio, un arrecife coralino nunca antes descrito.

El arrecife de Bahía Honda (Figura 1) está conformado por dos secciones diferenciadas por la unidad ecológica dominante. La primera sección, con una extensión de 30 m de largo por 20 m de ancho, se encuentra entre 2 y 4 m de profundidad. Se caracteriza como unidad ecológica de corales mixtos, con un considerable número de especies coralinas (Tabla 1). En esta sección predominan corales de crecimiento masivo, entre las cuales destacan por su abundancia y tamaño *Colpophyllia natans*, *Pseudodiploria strigosa* y *Siderastrea siderea* (Figura 2 A, B y F). Esta unidad es concordante con la registrada previamente en bahía Portete por Prah y Erhardt (1985), Solano (1994), Díaz et al. (2000) y Reyes et al. (2010).

Bahía Honda reef (Figure 1) is made up of two sections differentiated by the dominant ecological unit. The first section, with an extension of 30 m long by 20 m wide and located between 2 and 4 m deep, is characterized as an ecological unit of mixed corals, with a considerable number of coral species (Table 1). In this section, massive growth corals predominate, among which *Colpophyllia natans*, *Pseudodiploria strigosa* and *Siderastrea siderea* stand out for their abundance and size (Figure 2 A, B and F). This unit is consistent with that previously recorded in Portete Bay by Prah and Erhardt (1985), Solano (1994), Díaz et al. (2000) and Reyes et al. (2010).

La sección de corales mixtos se encuentra en excelente estado de conservación. Entre las especies observadas destaca la presencia de *Acropora palmata* de tamaño considerable (Figura 2 E), una especie listada como “críticamente amenazada” por la IUCN (2022) y “en peligro” por Ardila *et al.* (2002). También se observaron algunas colonias de *Acropora prolifera*. Otras especies observadas como *Stephanocoenia intercepta* y *Mycetophyllia ferox* enfrentan niveles de amenaza y han sido consideradas como Vulnerables y En Peligro (Ardila *et al.*, 2002).

La segunda sección corresponde a un arrecife franjeante somero que se extiende cerca de 1.8 km en dirección nororiente, hacia la punta de la bahía. En esta área predominan formaciones de *A. palmata*, lo que posiblemente convierte a este arrecife en el más

The mixed coral section is in an excellent conservation status. Among the observed species, the presence of elkhorn coral, *Acropora palmata*, colonies of considerable size stands out (Figure 2E), a species listed as “critically endangered” by the IUCN (2022) and “endangered” by Ardila *et al.* (2002). Some colonies of *Acropora prolifera* were also observed. Other observed species such as *Stephanocoenia intercepta* and *Mycetophyllia ferox* are also considered Vulnerable or Endangered (Ardila *et al.*, 2002).

The second section corresponds to a shallow fringing reef that extends about 1.8 km in a northeasterly direction, towards the tip of the bay. In this area, *A. palmata* formations are predominant, which possibly makes this reef the largest in the Colombian continental Caribbean with this species at present. This formation

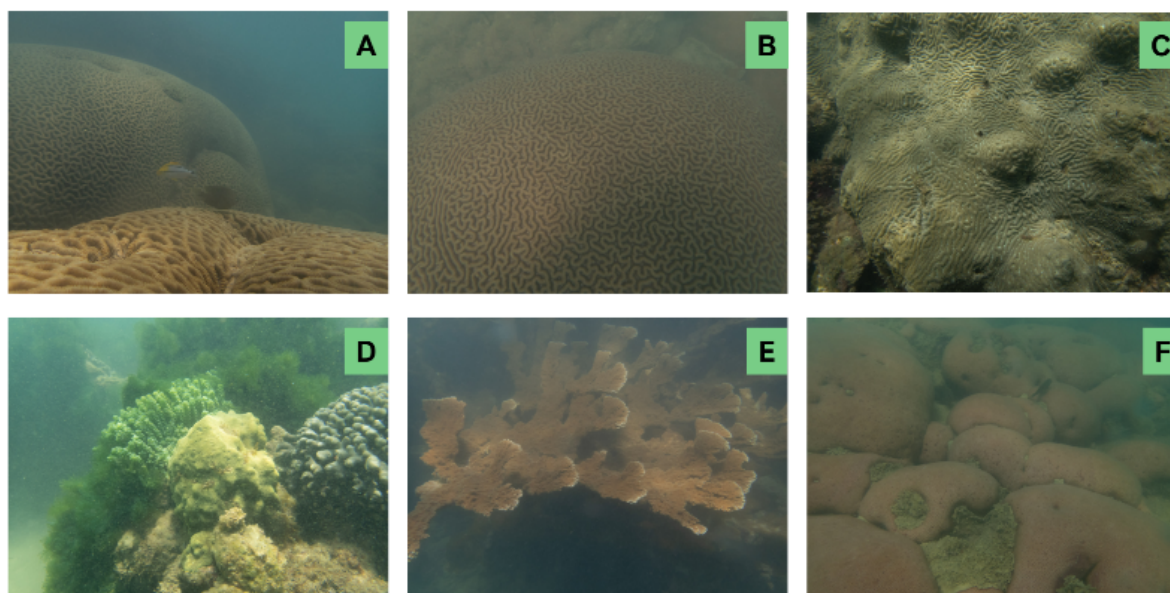


Figura 2. Algunas de las especies de coral observadas en la porción inicial del arrecife encontrado en la Bahía Honda en el 2022. A) *Colpophyllia natans*, B) *Pseudodiploria strigosa*, C) *Pseudodiploria clivosa*, D) *Porites astreoides* y *Porites porites*, E) *Acropora palmata* y F) *Siderastrea siderea*.

Figure 2. Some of the coral species observed in the initial portion of the reef in Bahía Honda in 2022.. A) *Colpophyllia natans*, B) *Pseudodiploria strigosa*, C) *Pseudodiploria clivosa*, D) *Porites astreoides* and *Porites porites*, E) *Acropora palmata* and F) *Siderastrea siderea*.

extenso del Caribe continental colombiano con esta especie, actualmente. Esta formación no había sido documentada en publicaciones previas sobre áreas coralinas colombianas (Prahl y Erhardt, 1985; Solano, 1994; Díaz *et al.*, 2000; Reyes *et al.*, 2010), ni en el último registro de *A. palmata* para el Caribe continental colombiano (García-Urueña *et al.*, 2022), en el cual se mencionan las formaciones del Parque Nacional Natural Tayrona como las más septentrionales.

La terraza posterior del arrecife, con menos de 0.5 m de

had not been documented in previous publications on Colombian coral areas (Prahl and Erhardt, 1985; Solano, 1994; Díaz *et al.*, 2000; Reyes *et al.*, 2010), nor in the last report about *A. palmata* formations in the Colombian continental Caribbean (García-Urueña *et al.*, 2022), in which the formations of the Tayrona National Natural Park are mentioned as the northernmost.

The backterrace of the reef, with less than 0.5 m depth is dominated by skeletons of *A. palmata*, colonies of hydrocorals *Millepora complanata* and *M. alcornis*, as well as by crustose

profundidad, está dominada por esqueletos de *A. palmata*, colonias de hidrocorales *Millepora complanata* y *M. alcicornis*, así como por colonias costrosas de *Porites astreoides*, *Siderastrea radians*, *Favia fragum* y reclutas de *A. palmata*. Las colonias de coral cuerno de alce abundan en la cresta y descienden hasta aproximadamente 3 m de profundidad, donde son reemplazadas por colonias de gran tamaño de *C. natans*, *P. strigosa* y *S. siderea* (Figura 3 A y E).

En esta exploración inicial, se registraron 22 especies de corales hermatípicos (Tabla 1), ocho de ellas no habían sido registradas previamente para La Guajira (Prahl y Erhardt, 1985; Díaz et al., 2000; Reyes et al., 2010): *A. palmata*, *A. prolifera*, *Diploria labyrinthiformis*, *Mycetophyllia lamarckiana*, *M. ferox*, *Meandrina meandrites* y *Dichocoenia stockesii*, todas ellas comunes en el Caribe continental colombiano. Especial mención merece la presencia de al menos diez colonias de una ecoforma de *Millepora*, dispersas en la unidad ecológica de corales mixtos a diferentes profundidades. Estas colonias tienen forma de esferas, con tamaños que varían entre 30 cm y 1 m de diámetro (Figura 4). Las ramas están ordenadas de manera uniforme, sin sobresalir de la superficie de la esfera. Esta forma particular no ha sido mencionada en estudios previos como el de Wedler (2017), donde solo se describen otras ecoformas de *M. complanata* y *M. alcicornis*. Ambas especies fueron observadas tanto en la franja de corales mixtos como en la barrera de *A. palmata*, dominando las zonas someras, tal como sucede en la terraza de bahía Portete (Solano, 1994).

En comparación con Portete, donde Prahl y Erhardt (1985) registraron 13 especies y Díaz et al. (2000) 26, se observaron diferencias importantes en la composición específica. En Bahía Honda no se registraron especies estructurantes como *Orbicella annularis* y *O. faveolata*, presentes en bahía Portete. Esto podría deberse a condiciones locales particulares o a la necesidad de realizar una caracterización más exhaustiva.

colonies of *Porites astreoides*, *Siderastrea radians*, *Favia fragum* and recruits of *A. palmata*. Colonies of elkhorn coral are abundant on the crest and descend to approximately 3 m depth, where they are replaced by large colonies of *C. natans*, *P. strigosa* and *S. siderea* (Figure 3 A and E).

In this initial exploration, 22 species of hermatypic corals were recorded (Table 1), eight of which had not been previously recorded for La Guajira (Prahl and Erhardt, 1985; Díaz et al., 2000; Reyes et al., 2010): *A. palmata*, *A. prolifera*, *Diploria labyrinthiformis*, *Mycetophyllia lamarckiana*, *M. ferox*, *Meandrina meandrites* and *Dichocoenia stockesii*, all of which are common in the Colombian continental Caribbean. Special mention should be made of the presence of at least ten colonies of a *Millepora* ecoform, dispersed in the mixed coral ecological unit at different depths. These colonies are sphere-shaped, with sizes varying between 30 cm and 1 m in diameter (Figure 4). The branches are arranged uniformly, without protruding from the surface of the sphere. This particular shape has not been mentioned in previous studies such as that of Wedler (2017), where only other ecoforms of *M. complanata* and *M. alcicornis* are described. Both species were observed both in the mixed coral fringe and in the *A. palmata* barrier, dominating the shallow areas, as occurs on the terrace of Portete bay (Solano, 1994).

Compared to the reefs of Bahía Portete, where Prahl and Erhardt (1985) recorded 13 species and Díaz et al. (2000) 26, important differences were observed in species number and composition in this reef. In Bahía Honda; structuring species such as *Orbicella annularis* and *O. faveolata*, present in Portete Bay, were not recorded. This could be due to local conditions or the need for more in-depth characterization.

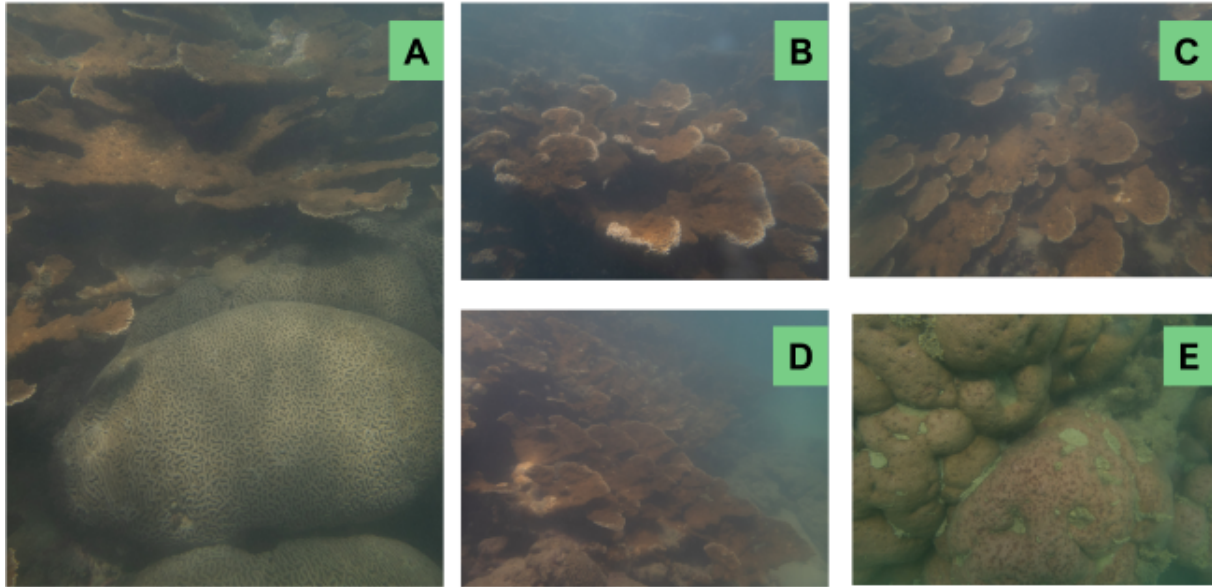


Figura 3. Imágenes del arrecife de *A. palmata* de Bahía Honda. A) límites de *A. palmata* y sucesión de las grandes colonias hemisféricas de *C. natans* y *P. strigosa*; B, C y D) vistas de la distribución, densidad y conformación de las colonias de *A. palmata*, y E) colonias de *S. siderea* ubicadas en las bases de la barrera, afectadas por la enfermedad del lunares oscuros..

Tabla 1. Listado de las especies de corales hermatípicos observadas en la formación arrecifal de Bahía Honda. Los números corresponden a registros publicados en otros trabajos y se listan a continuación: X observación de los autores; 1) Prah y Erhardt (1985); 2) Díaz *et al.* (2000); 3) Solano (1994); 4) Reyes *et al.* (2010). LC – Low Concern; VU – Vulnerable; EN - Endangered

Figure 3. Images of the *A. palmata* reef in Bahía Honda. A) *A. palmata* boundaries and succession of large hemispherical colonies of *C. natans* and *P. strigosa*; B, C and D) views of the distribution, density and conformation of *A. palmata* colonies, and E) *S. siderea* colonies located at the base of the barrier, affected by dark spot disease..

Tabla 1. List of hermatypic coral species observed in the Bahía Honda reef formation. The numbers correspond to records published previously and are listed below: X observation by the authors; 1) Prah and Erhardt (1985); 2) Díaz *et al.* (2000); 3) Solano (1994); 4) Reyes *et al.* (2010). LC – Low Concern; VU – Vulnerable; EN – Endangered..

Family	Species	References	Status
Milleporidae	<i>Millepora alcicornis</i> (Linnaeus, 1758)	X, 2, 3, 4	LC
	<i>Millepora complanata</i> (Lamarck, 1816)	X, 2, 4	LC
	<i>Millepora</i> sp.	X	
Astrocoeniidae	<i>Stephanocoenia intersepta</i> (Esper, 1795)	X, 1, 2	VU
Pocilloporidae	<i>Madrasia decactis</i> (Lyman, 1859)	X, 1, 2	LC
Acroporidae	<i>Acropora palmata</i> (Lamarck, 1816)	X	EN
	<i>Acropora prolifera</i> (Lamarck, 1816)	X	VU
Rizangiidae	<i>Siderastrea siderea</i> (Ellis y Solander, 1786)	X, 1, 2, 3, 4	LC
	<i>Siderastrea radians</i> (Pallas, 1766)	X, 1, 2, 3, 4	LC
Poritidae	<i>Porites astreoides</i> Lamarck, 1816	X, 1, 2, 3, 4	LC
	<i>Porites porites</i> (Pallas, 1766)	X, 1, 2, 3, 4	LC
Faviidae	<i>Colpophyllia natans</i> (Houttuyn, 1772)	X, 1	LC
	<i>Pseudodiploria strigosa</i> (Dana, 1846)	X, 1, 2, 3	LC
	<i>Pseudodiploria clivosa</i> (Ellis y Solander, 1786)	X, 1, 2, 3	LC
	<i>Diploria labyrinthiformis</i> (Linnaeus, 1758)	X	LC
	<i>Favia fragum</i> (Esper, 1793)	X, 1, 2, 3	LC

Family	Species	References	Status
	<i>Isophyllia sinuosa</i> (Ellis y Solander, 1786)	X, 2, 3, 4	LC
	<i>Mycetophyllia lamarckiana</i> (Milne Edwards y Haime, 1849)	X	LC
	<i>Mycetophyllia ferox</i> Wells, 1973	X	VU
Montastraeidae	<i>Montastraea cavernosa</i> (Linnaeus, 1767)	X, 2, 3	LC
Meandrinidae	<i>Meandrina meandrites</i> (Linnaeus, 1758)	X	LC
	<i>Dichocoenia stokesii</i> (Milne Edwards y Haime, 1849)	X	LC

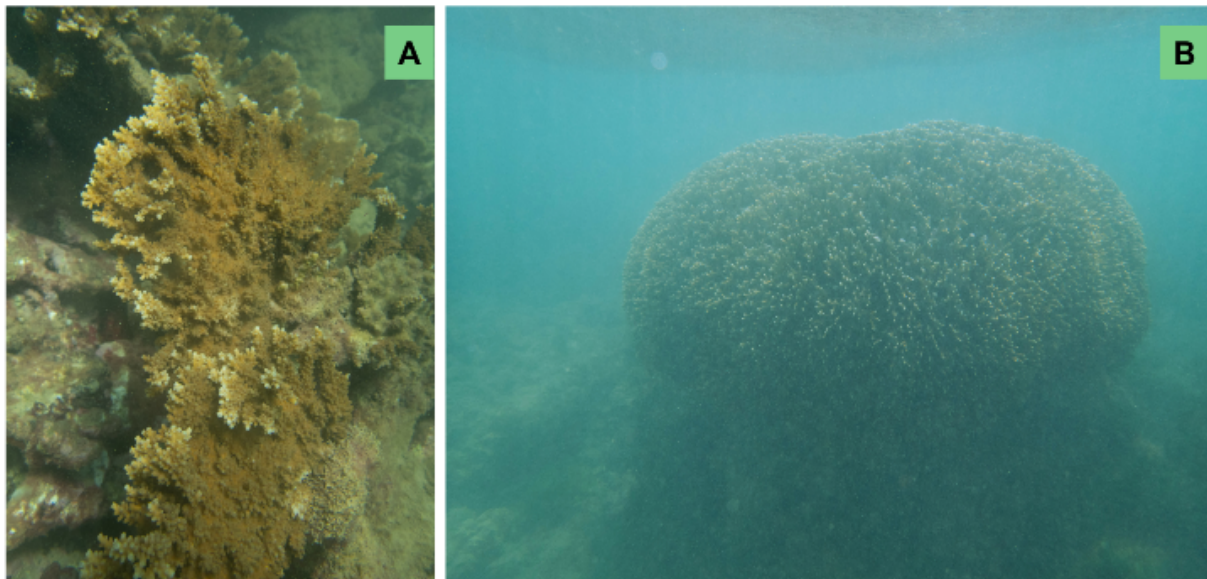


Figura 4. (A) Ejemplar de *Acropora prolifera* y B) ecoforma no registrada de *Millepora* observadas en el arrecife de Bahía Honda.

Figura 4. (A) *Acropora prolifera* specimen and (B) unrecorded *Millepora* ecoform observed on the Bahía Honda reef.

Con respecto a la salud coralina, el arrecife de Bahía Honda presenta un buen estado general, con la enfermedad de lunares oscuros (ELO) (Gil-Agudelo *et al.*, 2009; Navas-Camacho *et al.*, 2010) afectando únicamente colonias de *S. siderea*, sin evidencias de mortalidad asociada (Figura 3 E). No se observaron daños causados por anclas, redes o dinamita, probablemente debido al desconocimiento por parte de los pescadores locales de la existencia del arrecife y su la riqueza íctica.

En cuanto a los peces, se identificaron 30 especies de 12 familias (Tabla 2). Entre ellas destaca *Lutjanus cyanopterus* (Figura 5) una especie de gran tamaño que, en este arrecife, se observó en grupos de hasta 12 individuos juveniles de aproximadamente 60 cm de longitud, lo cual sugiere que el arrecife y el pecio cercano están siendo usado como guarderías.

Regarding coral health, the Bahía Honda reef is in good general condition, with Dark Spot Disease (DSD) (Gil-Agudelo *et al.*, 2009; Navas-Camacho *et al.*, 2010) affecting only *S. siderea* colonies, with no evidence of associated mortality (Figure 3 E). No damage caused by anchors, nets or dynamite was observed, probably due to local fishermen's lack of knowledge of the reef's existence and its richness in fish.

Regarding fish, 30 species from 12 families were identified (Table 2). Among them, *Lutjanus cyanopterus* stands out (Figure 5), a large species that, in this reef, was observed in groups of up to 12 young individuals of approximately 60 cm in length, which suggests that the reef and the nearby wreck are being used as nurseries.



Figura 5. Grupo de ejemplares del pargo *Lutjanus cyanopterus* presentes en el arrecife de Bahía Honda.

Figura 5. Group of specimens of the cuberasnapper *Lutjanus cyanopterus* present in the Bahía Honda reef.

Tabla 2. Listado de peces observados en el arrecife de Bahía Honda durante esta evaluación.

Table 2. List of fishes observed in the Bahía Honda reef during this assessment.

Family	Species
Pomacanthidae	<i>Holacanthus tricolor</i> (Bloch, 1795)
Acanthuridae	<i>Acanthurus coeruleus</i> Bloch & Schneider, 1801
	<i>Acanthurus chirurgus</i> (Bloch, 1787)
	<i>Acanthurus tractus</i> Poey, 1860
Carangidae	<i>Caranx ruber</i> (Bloch, 1793)
Sphyrnidae	<i>Sphyrna barracuda</i> (Edwards, 1771)
Ephippidae	<i>Chaetodipterus faber</i> (Broussonet, 1782)
Haemulidae	<i>Haemulon aurolineatum</i> Cuvier, 1830
	<i>Anisotremus virginicus</i> (Linnaeus, 1758)
	<i>Anisotremus surinamensis</i> (Bloch, 1791)
	<i>Orthopristis</i> sp.
Lutjanidae	<i>Lutjanus apodus</i> (Walbaum, 1792)
	<i>Lutjanus cyanopterus</i> (Cuvier, 1828)
	<i>Lutjanus jocu</i> (Bloch & Schneider, 1801)
	<i>Lutjanus mahogoni</i> (Cuvier, 1828)
Pomacentridae	<i>Stegastes adustus</i> (Troschel, 1865)
	<i>Stegastes partitus</i> (Poey, 1868)
	<i>Microspathodon chrysurus</i> (Cuvier, 1830)
	<i>Abudefduf taurus</i> (Müller & Troschel, 1848)

	<i>Abudefduf saxatilis</i> (Linnaeus, 1758)
Labridae	<i>Scarus iseri</i> (Bloch, 1789)
	<i>Sparisoma viride</i> (Bonnaterre, 1788)
	<i>Sparisoma chrysotermum</i> (Bloch & Schneider, 1801)
	<i>Sparisoma rubripinne</i> (Valenciennes, 1840)
	<i>Halichoeres bivittatus</i> (Bloch, 1791)
	<i>Halichoeres maculipinna</i> (Müller & Troschel, 1848)
	<i>Thalassoma bifasciatum</i> (Bloch, 1791)
Gobiidae	<i>Coryphopterus personatus</i> (Jordan & Thompson, 1905)
Chaenopsidae	<i>Acanthemblemaria rivasi</i> Stephens, 1970
Blenniidae	<i>Ophioblennius macclurei</i> (Silvester, 1915)

El arrecife coralino de Bahía Honda, especialmente la extensa barrera de *A. palmata*, constituye un ecosistema coralino relevante para la Alta Guajira y el Caribe continental colombiano. Su buen estado de conservación podría atribuirse a factores como la baja densidad poblacional, la turbidez del agua, y la percepción local de los corales como “piedras”, lo que limita las actividades humanas en el área. Este hallazgo adquiere mayor importancia frente al proyecto de construcción de un puerto en Bahía Honda, subrayando la necesidad de su conservación e investigación para garantizar su preservación futura.

AGRADECIMIENTOS

Al Invemar, y en particular al proyecto “Caracterización y evaluación del estado de los ecosistemas marinos y costeros (manglares, corales y pastos marinos) del PNN Bahía Portete-Kaurrele, Bahía Honda y Hondita (departamento de La Guajira) y recomendaciones para la implementación del sistema de monitoreo a largo plazo”. Beca 81272920, proyecto BEM 011-22, por haber posibilitado la evaluación de Bahía Honda.

The Bahía Honda fringing reef, particularly the extensive *A. palmata* barrier, constitutes a relevant coral ecosystem for Alta Guajira and the Colombian continental Caribbean. Its good state of conservation could be attributed to factors such as low population density, water turbidity, and the local perception of corals as “stones,” which limits human activities in the area. This finding becomes more important in light of the project to build a port in Bahía Honda, highlighting the need for its conservation and research to ensure its future preservation.

ACKNOWLEDGEMENTS

To Invemar, and in particular to the project “Characterization and evaluation of the state of marine and coastal ecosystems (mangroves, corals and seagrasses) of the Bahía Portete-Kaurrele, Bahía Honda and Hondita PNN (La Guajira department) and recommendations for the implementation of the long-term monitoring system.” Grant 81272920, project BEM 011-22, for making the evaluation of Bahía Honda possible.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Ardila, N.E., Navas, G.R. and Reyes, J.O. eds., (2002). *Libro rojo de invertebrados marinos de Colombia*. Bogotá: INVEMAR. Ministerio de Medio Ambiente. La serie Libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Available at: https://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/lrojo/LR_INVERTEBRADOS.pdf [Accessed 30 Apr. 2025].
- Barrios, L.M., Cendales, M.H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J. and López-Victoria, M. (2000). Áreas coralinas de Colombia. Santa Marta: Invemar. *Serie de Publicaciones Especiales*, 5.
- Crabbe, J., Banaszak, A., Croquer, A., Villamizar, E. and Miller, M. (2021). IUCN Red List of Threatened Species: *Acropora palmata*. IUCN Red List of Threatened Species. Available at: <https://www.iucnredlist.org/species/133006/165672016> [Accessed 30 Apr. 2025].
- Crabbe, J., Banaszak, A., Croquer, A., Villamizar, E. and Miller, M. (2021). *IUCN Red List of Threatened Species: Acropora palmata*. IUCN Red List of Threatened Species. Available at: <https://www.iucnredlist.org/species/133006/165672016> [Accessed 30 Apr. 2025].
- Díaz Merlano, J.M., Barrios Suárez, L.M. and Gómez-López, D.I. eds., (2003). *Las praderas de pastos marinos en Colombia: estructura y distribución de un ecosistema estratégico*. Santa Marta: Invemar.
- García-Urueña, R., Kitchen, S.A. and Schizas, N.V. (2022). Fine scale population structure of *Acropora palmata* and *Acropora cervicornis* in the Colombian Caribbean. *PeerJ*, 10, p.e13854. <https://doi.org/10.7717/peerj.13854>.
- Garzón-Ferreira, J. and Diaz, J.M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. In: J. Cortés, ed., *Latin American Coral Reefs*. San Pedro, Costa Rica: Elsevier Science, pp. 275–301. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50013-8>
- Gil-Agudelo, D.L., Navas-Camacho, R., Rodríguez-Ramírez, A., Reyes-Nivia, M.C., Bejarano, S., Garzón-Ferreira, J. and Smith, G.W. (2009). Enfermedades coralinas y su investigación en los arrecifes colombianos. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38(2), pp. 189–224. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2009.38.2.178>.
- Navas-Camacho, R., Gil-Agudelo, D.L., Rodríguez-Ramírez, A., Reyes-Nivia, M.C. and Garzón-Ferreira, J. (2010). Coral diseases and bleaching on Colombian Caribbean coral reefs. *Revista de Biología Tropical*, 58(1), pp.95–106. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i1.20026>.
- Reyes, J., Santodomingo, N. and Flórez, P. (2010). Corales escleractinios de Colombia. Santa Marta: Invemar. *Serie de Publicaciones Especiales*, 14.
- Solano, O.D. (1994). Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas Punta Betón*, 23, pp. 149–163. <https://doi.org/10.25268/bimc.in->



NOTA / NOTE

Descubrimiento de la vaca enmascarada *Hypoplectrus providencianus* (Serranidae) en la costa noroccidental de América del Sur

Discovery of the masked hamlet *Hypoplectrus providencianus* (Serranidae) in the coast of northwestern South America.

Alberto Rodríguez-Ramírez^{1*}

✉: 0000-0003-4855-7345

alberto.rodriguez@uqconnect.edu.au*

Nelson Alejandro Lozano Mendoza²

✉ 0000-0001-7886-777X

nelozanom@unal.edu.co

1. Investigador Independiente, Brisbane, Australia.

2. Cecimar, Universidad Nacional de Colombia Sede Caribe, Santa Marta, Colombia.

*Autor de correspondencia/Corresponding Author

Recibido / Received: 27/01/2025

Aceptado / Accepted: 19/05/2025

Citación / Citation: Rodríguez-Ramírez, A.; Lozano-Mendoza, N.A. 2025. Descubrimiento de la vaca enmascarada *Hypoplectrus providencianus* (Serranidae) en la costa Noroccidental de América del Sur. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2):171-175

RESUMEN

Se documenta por primera vez la presencia de la vaca enmascarada *Hypoplectrus providencianus* en los arrecifes franjeantes del área de Santa Marta y el Parque Nacional Natutal Tayrona (Caribe continental colombiano). Con base en varios avistamientos y fotografías tomadas entre 2005 y 2023, la distribución geográfica conocida de la vaca enmascarada se extiende dentro del Gran Caribe, de la provincia central a la provincia sur, específicamente en la costa noroccidental de América del Sur.

Palabras clave: Primer registro, distribución geográfica, *Hypoplectrus providencianus*, peces errantes

ABSTRACT

The presence of the masked hamlet *Hypoplectrus providencianus* is documented for the first time in fringing reefs of the Santa Marta area and Tayrona National Natural Park (Colombian continental Caribbean). Based on several sightings and photographic records taken between 2005 and 2023, the known geographic distribution of the masked hamlet has extended within the Greater Caribbean from the Central Province to the Southern Province, specifically on the coast of northwestern South America.

Key words: First record, geographic distribution, *Hypoplectrus providencianus*, vagrant species

INTRODUCCIÓN

La vaca enmascarada *Hypoplectrus providencianus* es un pez endémico del Caribe descrito por Acero y Garzón-Ferreira (1994). Está incluido dentro del grupo de especies de *Hypoplectrus* reconocidas sin ambigüedad (Lobel, 2011; Puebla *et al.*, 2022). Esta especie es considerada de Preocupación Menor dentro de la Lista Roja de la IUCN (Anderson *et al.*, 2015) y como Casi Amenazada (NT, Near Threatened *sensu* Anderson *et al.*, 2015) dentro del Libro Rojo de Peces Marinos de Colombia (Polanco y Acero, 2017).

Hypoplectrus providencianus es una especie costera tropical que frecuenta ambientes arrecifales, carnívora que se alimenta de crustáceos bentónicos móviles y peces (Robertson y Van Tessell, 2023). Según la descripción del holotipo y paratipo (Acero y Garzón-Ferreira, 1994), la vaca enmascarada puede llegar a tener una longitud total máxima de 130 mm; cabeza y cuerpo color blanco cremoso, con una barra negra en forma de cuña debajo del ojo (carácter diagnóstico); aletas pectorales negras o al menos con borde superior negro; mancha peduncular negra entre bien desarrollada a ausente; aleta caudal negra o gris con bordes superior e inferior negros; aletas dorsal y anal gris pálidas (a veces con tonos azules); aletas pélvicas gris-azuladas a negras (Acero y Garzón-Ferreira, 1994; Robertson y Van Tessell, 2023). Dentro de las especies del género, *H. providencianus* se considera geográficamente restringida (Domeier, 1994; Aguilar-Perera y González-Salas, 2010; Holt, Côté y Emerson, 2010). Esta especie es más comúnmente observada en las áreas insulares del Caribe occidental, pero también se ha detectado en las costas del Caribe continental de Centro América, desde México hasta Panamá (Acero y Garzón-Ferreira, 1994; Heemstra, Anderson y Lobel, 2002; Puebla *et al.*, 2022; Robertson y Van Tessell, 2023).

El primer avistamiento de *H. providencianus* en el Caribe continental colombiano fue hecho por ARR en Punta Betín, Santa Marta (11° 14' 59.6" N, 74° 13' 15.2" O) en abril 6 de 2005. El espécimen fue fotografiado (Figura 1A) a 5 m de profundidad en una de las estaciones de monitoreo de arrecifes del SIMAC (Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia) con escasas y dispersas colonias de coral creciendo directamente sobre rocas. Independientemente de múltiples jornadas de monitoreo arrecifal y horas de buceo hechas por ARR entre

INTRODUCTION

The masked hamlet *Hypoplectrus providencianus*, described by Acero and Garzón-Ferreira (1994), is endemic to the Caribbean. It is included within the group of unambiguously recognized *Hypoplectrus* species (Lobel, 2011; Puebla *et al.*, 2022); it is classified as Least Concern by the IUCN Red List (Anderson *et al.*, 2015), and as Near Threatened (NT *sensu* Anderson *et al.*, 2015) by the Red Book of Marine Fishes of Colombia (Polanco and Acero, 2017).

This tropical coastal fish species found on coral reefs, is a carnivorous that feeds on mobile benthic crustaceans and fishes (Robertson and Van Tessell, 2023). According to the holotype and paratype descriptions (Acero and Garzón-Ferreira, 1994), the masked hamlet reaches up to 130 mm (total length); head and body pale tan with a black tear-like bar below the eye (diagnostic character); pectoral fins black or at least with upper border black; black caudal saddle well developed to absent; caudal fin entirely black or pale grey with upper and lower dark margins; dorsal and anal fins pale grey (sometimes with a blue cast); pelvic fins blue-grey to black (Acero and Garzón-Ferreira, 1994; Robertson and Van Tessell, 2023). Among the hamlets species, *H. providencianus* is considered geographically restricted (Domeier, 1994; Aguilar-Perera and González-Salas, 2010; Holt, Côté and Emerson, 2010) with observations commonly reported across Western Caribbean islands; however it is also documented on the Central America coast, from Mexico to Panama (Acero and Garzón-Ferreira, 1994; Heemstra, Anderson and Lobel, 2002; Puebla *et al.*, 2022; Robertson and Van Tessell, 2023).

Hypoplectrus providencianus was discovered on the Colombian continental Caribbean by ARR around the landmark known as Punta Betín in Santa Marta (11° 14' 59.6" N 74° 13' 15.2" W) on April 6, 2005. The specimen was photographed (Figure 1A) at a depth of 5 m, near a reef monitoring site of the National Monitoring System of Coral Reefs in Colombia (SIMAC), characterized by sparse and scattered coral colonies growing directly on rocks. Despite multiple coral reef monitoring activities and over 500 hours of diving conducted by ARR between 1998 and 2008 in the same area, this was the only record of the masked hamlet during this period.

Recently, the masked hamlet was observed by NALM in Granate

1998 y 2008 en el área (más de 500 horas), éste fue el único avistamiento de la vaca enmascarada en este período.



Figura 1. A) *Hypoplectrus providencianus* observado en Punta Betín en 2005 y fotografiado por ARR. B) Especimen observado en la ensenada de Granate en 2023 y fotografiado por NALM.

Recientemente, la vaca enmascarada fue observada por NALM en julio 23, 2023 en la ensenada de Granate ($11^{\circ} 17' 50.92''$ N, $74^{\circ} 11' 36.10''$ O), Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT), durante un buceo a 8 m de profundidad. El individuo se encontró en cercanías a un arrecife de rocas sobre fondo arenoso (Figura 1B). Este individuo presentó un patrón de coloración ligeramente diferente al del holotipo descrito por Acero y Garzón-Ferreira (1994) en la parte frontal del rostro y en sus aletas.

Además de los avistamientos descritos arriba, investigadores han observado ejemplares *H. providencianus* en septiembre del año 2020 en la ensenada de Granate (A. Acosta, J. González, A. Polanco, com. pers.), y más recientemente en marzo de 2025 en la bahía de Gaira, cerca de playa Bonita (A. Bernal, M. Pineda, com.pers.). Así mismo, la vaca enmascarada se ha observado en diferentes ocasiones en los últimos años durante actividades de buceo recreativo en varios lugares de Santa Marta y el PNNT (S. Estrada, com. pers.).

Es interesante que la vaca enmascarada no haya sido detectada antes de 2005 en el área de Santa Marta considerando el gran esfuerzo hecho para documentar la riqueza de especies en esta área desde de la década de los años setenta (Garzón y Acero, 1983; Acero, Garzón y Köster, 1984; Acero y Garzón, 1987; Acero y Garzón, 1989; Reyes-Nivia, Rodríguez-Ramírez y Garzón-Ferreira, 2004; Olaya-Restrepo, Reyes-Nivia y Rodríguez-Ramírez, 2008). Además se desconoce el porqué esta especie puede ser encontrada ahora en estos arrecifes conti-

Bay ($11^{\circ} 17' 50.92''$ N, $74^{\circ} 11' 36.10''$ W) within the Tayrona National Natural Park (TNNP) on July 23, 2023, at 8 m depth. The



Figure 1. A) *Hypoplectrus providencianus* observed in Punta Betín on 2005 and photographed by ARR. B) Specimen observed in Granate Bay on 2023 and photographed by NALM.

specimen was found around a rocky reef occurring on a sandy bottom (Figure 1B). This specimen is slightly different from the holotype described by Acero and Garzón-Ferreira (1994) in the coloration of its forehead and fins.

Aside from the sightings mentioned above, researchers have observed individuals of *H. providencianus* in September 2020 at Granate Bay (A. Acosta, J. González, A. Polanco, pers. comm.) and more recently in March 2025 at Gaira Bay near Bonita Beach (A. Bernal, M. Pineda, pers. comm.). Additionally, the masked hamlet has been spotted several times in recent years during recreational diving activities around the Santa Marta area and the PNNT (S. Estrada, pers. comm.).

It is intriguing the masked hamlet had not been detected in the Santa Marta area before 2005 considering the large efforts made to document reef fish richness in the area since the 1970s' decade (Garzón and Acero, 1983; Acero, Garzón and Köster, 1984; Acero and Garzón, 1987; Acero and Garzón, 1989; Reyes-Nivia, Rodríguez-Ramírez and Garzón-Ferreira, 2004; Olaya-Restrepo, Reyes-Nivia and Rodríguez-Ramírez, 2008). It is further unknown why this species can now be found around these continental coral reefs. This indicates the geographic range of the masked hamlet within the Greater Caribbean has extended, from the Central Province to the Southern Province (biogeographically, sensu Robertson and Cramer, 2014), specifically to the continental coastline of Northwestern South America (Colombia). It also suggests that this geographic range expansion has occurred recently

nentales. Si bien esto indica la extensión del rango geográfico de distribución de la vaca enmascarada dentro del Gran Caribe, de la provincia central a la sur (*biogeografía sensu Robertson y Cramer, 2014*), específicamente en la costa noroccidental de América del Sur (Colombia), también implicaría que dicha extensión ha ocurrido recientemente (en las últimas tres décadas). Debido a que los avistamientos descritos anteriormente están separados temporalmente (2005, 2020, 2023 y 2025) y aparentemente limitados geográficamente (a lo largo de 15 km de costa), se sugiere que individuos expatriados de *H. providencianus* han estado habitando recientemente el área de Santa Marta y el PNNT. Sin embargo, entender los mecanismos que explican el origen de estos individuos, así como las implicaciones ecológicas de su presencia en estos arrecifes franjeantes requerirán de investigación adicional involucrando estudios demográficos y análisis genéticos. *Hypoplectrus providencianus* probablemente podrá ser encontrado en otras localidades con ambientes arrecifales de la plataforma continental de la costa noroccidental de América del Sur.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los evaluadores por sus valiosos comentarios y aportes. Agradecemos también a las siguientes personas e instituciones por compartir información de avistamientos: Andrés Acosta, Juan David González, Andrea Polanco (Invemar, ensenada Granate 2020); Andrea Bernal, Miguel Ángel Pineda, Esteban Jaramillo (Fundación CIM Caribe, ensenada Gaira 2025); Santiago Estrada (Centro de Buceo Reef Shepherd). El primer registro se llevó a cabo durante las actividades del proyecto “Estado actual de las comunidades de peces arrecifales del área de Santa Marta: un soporte para el manejo del AMP PNNT”. Este proyecto se realizó gracias al apoyo financiero de Colciencias (proyecto N° 21-05-09-16826) e Invemar. Raúl Navas acompañó a ARR durante el buceo del avistamiento. ARR agradece a Catalina Reyes, Nadia Santodomingo, Johanna Vega, Julián Olaya, Jaime Garzón y Raúl Navas por sus invaluable contribución a este proyecto. El avistamiento hecho por NALM se realizó en el marco de la iniciativa institucional “Arrecifes Tayrona, Research Project” liderada por el Profesor Sven Zea y sus estudiantes de doctorado Catalina Gómez-Cubillos y Carlos Daza-Guerra, y el conjunto invaluable de tesis de maestría, estudiantes de pregrado y pasantes (UNA). NALM agradece la confianza de sus maestros, amigos y colegas

(within the last three decades). Given that the sightings described above are temporally spaced (2005, 2020, 2023 and 2025) and geographically limited (within 15 km of the coast), it is suggested that vagrants of *H. providencianus* have recently been inhabiting the Santa Marta area and the TNNP. However, understanding the mechanisms behind the origin of these individuals and the ecological consequences of their presence in these fringing reefs will require further research, including demographic and genetic analyses. Based on this record, it is likely *H. providenciaunus* can be found in other localities with coral reef environments along the continental shelf of Northwestern South America.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the reviewers and editor for their valuable comments and contributions. We also extend our gratitude to the following persons and institutions for sharing sighting information: Andrés Acosta, David González, Andrea Polanco (Invemar, Granate Bay 2020); Andrea Bernal, Miguel Ángel Pineda, Esteban Jaramillo (Fundación CIM Caribe, Gaira Bay 2025); Santiago Estrada (Reef Shepherd Dive Center). The first record was done during the activities of the project “Estado actual de las comunidades de peces arrecifales del área de Santa Marta: un soporte para el manejo del AMP PNNT”. Funding for this project was provided by COLCIENCIAS (project N° 21-05-09-16826) and INVEMAR. Raúl Navas was ARR’s buddy diver during the sighting. ARR thanks to Catalina Reyes, Nadia Santodomingo, Johanna Vega, Julián Olaya, Jaime Garzón, and Raúl Navas for their invaluable contributions throughout this research project. The sighting made by NALM was carried out within the framework of the interinstitutional initiative “Arrecifes Tayrona, Research Project” led by Professor Sven Zea and his doctoral students Catalina Gómez-Cubillos and Carlos Daza-Guerra, and the invaluable group of master students, undergraduate students, and interns (UNAL). NALM thanks to his mentors, friends, and colleagues.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Acero P, A. and Garzón, J. (1989). Peces arrecifales de la región de Santa Marta (Caribe colombiano). II. Tres nuevos registros para el sur del Caribe. *Caribbean Journal of Science*, 25, pp. 41–44.
- Acero P, A., Garzón F, J. and Köster, F. (1984). Lista de los peces óseos conocidos de los arrecifes del Caribe colombiano, incluyendo 31 nuevos registros y descripciones. *Caldasia*, 14(66), pp. 37–84. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/34889>.
- Acero P, A. and Garzón, J. (1989). Peces arrecifales de la región de Santa Marta (Caribe colombiano). II. Tres nuevos registros para el sur del Caribe. *Caribbean Journal of Science*, 25, pp. 41–44.
- Acero P, A. and Garzón-Ferreira, J. (1994). Descripción de una especie nueva de *Hypoplectrus* (Pisces: Serranidae) del Caribe occidental y comentarios sobre las especies colombianas del género. *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*, 23, pp. 5–14. <https://doi.org/10.25268/bimc.invevar.1994.23.0.386>.
- Aguilar-Perera, A. and González-Salas, C. (2010). Distribution of the genus *Hypoplectrus* (Teleostei: Serranidae) in the Greater Caribbean Region: support for a color-based speciation. *Marine Ecology*, 31(2), pp. 375–387. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2009.00339.x>.
- Anderson, W., Carpenter, K.E., Gilmore, G., Milagrosa Bustamante, G. and Robertson, R. (2015). (2015). *Hypoplectrus providencianus*, The IUCN Red List of Threatened Species 2015:e.T10724A46910291. Available at: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-2.RLTS.T10724A46910291.en> (Accessed: 20 November 2024).
- Domeier, M.L. (1994). Speciation in the serranid fish *Hypoplectrus*, *Bulletin of Marine Science*, 54(1), pp. 103–141. Available at: <https://www.ingentaconnect.com/content/umrms/bullmar/1994/00000054/00000001/art00010> (Accessed: 20 November 2024).
- Garzón F, J. and Acero P, A. (1983). Nuevos registros de peces arrecifales para el Caribe colombiano', *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*, 13, pp. 85–109. <https://doi.org/10.25268/bimc.invevar.1983.13.0.484>.
- Heemstra, P.C., Anderson, W.D. and Lobel, P.S. (2002). Serranidae, Groupers (seabasses, creolefish, hinds, hamlets, anthiines, and soapfishes). In *The Living Resources of the Western Central Atlantic, Vol 2. Bony Fishes, Part 1 (Acipenseridae to Grammatidae)*. Roma: FAO (FAO Special Identification Guide for Fishery Purposes and American Society of Ichthyologists and Herpetologists, 5), pp. 1308–1369.
- Holt, B.G., Côté, I.M. and Emerson, B.C. (2010). Signatures of speciation? Distribution and diversity of *Hypoplectrus* (Teleostei: Serranidae) colour morphotypes. *Global Ecology and Biogeography*, 19(4), pp. 432–441. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00539.x>.
- Lobel, P.S. (2011). A review of the Caribbean hamlets (Serranidae, *Hypoplectrus*) with description of two new species. *Zootaxa*, 3096(1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3096.1.1>.
- Olaya-Restrepo, J., Reyes-Nivia, M.C. and Rodríguez-Ramírez, A. (2008) 'Ensamblajes de peces arrecifales del área de Santa Marta y el Parque Nacional Natural Tayrona. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(1), pp. 111–127. <https://doi.org/10.25268/bimc.invevar.2008.37.1.185>.
- Polanco F, A. and Acero P, A. (2017). *Hypoplectrus providencianus*, in *Libro rojo de peces marinos de Colombia*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras Invevar, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Serie Publicaciones Generales # 93), pp. 341–343.
- Puebla, O., Coulmance, F., Estapé, C.J., Estapé, A.M. and Robertson, D.R. (2022). A review of 263 years of taxonomic research on *Hypoplectrus* (Perciformes: Serranidae), with a redescription of *Hypoplectrus affinis* (Poey, 1861). *Zootaxa*, 5093(2), pp. 101–141. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.5093.2.1>.
- Reyes-Nivia, M.C., Rodríguez-Ramírez, A. and Garzón-Ferreira, J. (2004). Peces asociados a formaciones coralinas de cinco áreas del Caribe colombiano: listado de especies y primeros registros para las áreas', *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33, pp. 101–115. <https://doi.org/10.25268/bimc.invevar.2004.33.0.250>.
- Robertson, D.R. and Cramer, K.L. (2014). Defining and Dividing the Greater Caribbean: Insights from the Biogeography of Shorefishes, *PLOS ONE*, 9(7), p. e102918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102918>.
- Robertson, D.R. and Van Tessell, J. (2023). *Shorefishes of the Greater Caribbean: online information system, Version 3.0 Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa, Panamá*. Available at: <https://biogeodb.stri.si.edu/caribbean/en/pages>.



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/issue/archive>. 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

Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras (title abbreviation: Bol. Invest. Mar. Cost.) 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.

Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 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/issue/archive>. The journal is indexed on Scopus since 2016 (Q2 Scimago Journal Ranking) and on Publindex (category C).

Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 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. Authors should follow the subsequent instructions:

Languages: Spanish and American English. The Bulletin

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.

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

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. Starting in 2025, authors will be responsible for translating their articles into either English or Spanish, depending on the target language, as well as for ensuring the quality of the translation. While the journal will not provide translation services, it may suggest professional translators or recommend appropriate translation tools upon request.

Note: 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.

FORMAT:

Type of font: Calibri, 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

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.

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

be attractive and no longer than 20 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 200 words. **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.

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.

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,

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, texts must be in Spanish and English separated by a slash (/). Moreover, they must be numbered and placed as they are first cited in the text.

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 three 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

según sea el caso:

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. Vilorio. 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 (o en www.abbreviations.com, cuando en el anterior sitio web no se encuentre la revista). Para *revistas no listadas*, debe presentarse el nombre completo.

Los **libros** se deben citar de la siguiente manera:

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., Nárvaez, J.C. and Vilorio, E.A. (2007). ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fisheries Research*, 88: pp. 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, p. 75.

For **books**, must follow next format:

Author (period) (Year) (period) Title (period) City (Two periods) Publisher (comma) Total number of pages (p.).

i.e.: Dahl, G. (1971). *Los peces del norte de Colombia*. Bogotá: Inderena.

For the **chapter of books**, must follow the next format:

Author (period) Year (period) "Chapter name" (period) Page rank (period). In: *Title of the book* (period) City (Colon) Editors' name (period). Publisher (comma) Page numbers.

i.e.: Álvarez-León, R. and Blanco, J. (1985). Composición de las comunidades ictiofaunísticas de los complejos lagunares. In: A. Yáñez- Arancibia, ed., *Fish community ecology in estuaries and coastal lagoons*. México: UNAM, pp.535-555.

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

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(s). (Year). *Title of thesis*. Type of thesis, Name of institution. Available at: URL (Accessed: Day Month Year).

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., Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Reports are quoted as follows:

Author or Organisation (period) (Year) (period) *Title* (period) Report type or number (Period) (comma) City (colon) Organization.

i.e.: Pedraza, R.A., S. Suárez y R. Julio. (1979). *Evaluación de captura en la Ciénaga Grande de Santa Marta*. Informe final. Bogotá: Inderena.

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., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. (2008). *PAST - Palaentological Statistics, ver. 1.81*. <http://folk.uio.no/ohammer/>

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

de cada artículo. Si el documento tiene DOI, añádalo.

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 -
Palaentological Statistics, ver. 1.81. [http://folk.uio.no/ohammer/
past/past.pdf](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/>

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.

PROCESO DE REVISIÓN

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.

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/>

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.

REVIEW PROCESS

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.

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.

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.

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.

The evaluation process in the **Boletín de Investigaciones Marinas
y Costeras** 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

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.

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.

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.

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.

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.

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. Publicación en línea e impresión. 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

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.

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.

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. Online publishing and printing. 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.

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.

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

Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 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 **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras**, 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 **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras** 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

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 fungen 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.

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

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.

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 **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras**.

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

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.

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.

