

Boletín Científico CIOH

43 Núm. 1
Junio de 2024

**Ministerio de Defensa Nacional
Dirección General Marítima
Centro de Investigaciones Oceanográficas e
Hidrográficas del Caribe (CIOH)
Centro de Investigaciones Oceanográficas e
Hidrográficas del Pacífico (CCCP)**

BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH

Dirección General Marítima (Dimar)
Centro de Investigaciones Oceanográficas
e Hidrográficas del Caribe (CIOH)
Centro de Investigaciones Oceanográficas
e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP)
Nº. 43 (1), páginas 3-88, junio del 2024

DIRECTOR GENERAL MARÍTIMO

Vicealmirante John Fabio Giraldo Gallo

DIRECTOR BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH

Capitán de Navío José Andrés Díaz Ruiz
Director CIOH

COORDINADORA EDITORIAL

Angélica María Castrillón-Gálvez
Máster en Edición de Publicaciones Dimar

EDITORA JEFE

Andrea Carolina Herrera Mesa, M.Sc.-CIOH

ASISTENTE EDITORIAL

Juan David Malaver González, filósofo-CIOH

COMITÉ EDITORIAL-MIEMBROS EXTERNOS

Luis Jesús Otero Díaz, Ph.D.
Grupo de investigación en Geociencias GEO4
Universidad del Norte
Yanis Cruz Quintana, Ph. D.
Grupo de Investigación en Sanidad Acuícola, Inocuidad
y Salud Ambiental
Universidad Técnica de Manabí (Ecuador)
Bismarck Jigena Antelo, Ph.D.
Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación
y Construcciones Navales.
Universidad de Cádiz (España)
Juan Gabriel Rueda Bayona, Ph.D.
Grupo de investigación HIDROMAR-IREHISA
Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
Mónica María Zambrano Ortiz, Ph.D.
Corporación Académica Ambiental
Universidad de Antioquia
Mary Luz Cañón Páez, Ph.D.
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)
Andrea Corredor-Acosta, Ph.D.
Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas
Marinos de Altas Latitudes (IDEAL).
Universidad Austral de Chile
Eduardo Santamaría del Ángel, Ph.D.
Facultad de Ciencias Marinas.
Universidad Autónoma de Baja California (México)

COMITÉ EDITORIAL-MIEMBROS INTERNOS

Capitán de Navío José Andrés Díaz Ruiz
Director CIOH

CUBIERTA

Aspecto Expedición Científica Seaflower 2021-II, isla
Cayos de Bajo Nuevo. (Foto: CCO).

COMITÉ CIENTÍFICO

Iván Martín León Luna
Universidad del Atlántico
Carlos Alberto Almanza Junco
Universidad Militar Nueva Granada
Julio César Herrera Carmona
Universidad del Valle
Mauricio Alejandro Perea Ardila
Universidad Federal de Ceara
Guillermo Gomer Cotrina Cabello
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión de Cerro
de Pasco
César Enrique López Arrillaga
Universidad Politécnica Territorial de los Valles del Tuy
Ángel Leonardo Rojas Rodríguez
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"
Laura Charlotte Exley
The Osa Foundation COPROT Tortugas de Osa
Germán David Patarroyo Camargo
Universidad Industrial de Santander
Yeison Alberto Garcés Gómez
Universidad Católica de Manizales
Luis Ernesto Paz Enrique
Universidad Nacional Autónoma de México
Sonia Esperanza Reyes Gómez
Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y
del Caucho (ICIPC)

EDITORIAL DIMAR

DISEÑO Y COMPOSICIÓN

Dinamica S.A.S.



Boletín Científico CIOH por Dimar se encuentra bajo una Licencia
Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported.
Basada en una obra en www.cioh.org.co

El *Boletín Científico CIOH* es una revista científica seriada, especializada en las diferentes áreas de investigación de las ciencias del mar (oceanografía, hidrografía, manejo integrado de zonas costeras, protección del medio marino, etc.), dirigida a la comunidad científica y la academia en el ámbito global. Publica semestralmente artículos científicos inéditos y arbitrados, producto de proyectos de investigación adelantados por los centros de investigaciones científicas marinas de la Dirección General Marítima y de otros institutos, e investigadores que realicen contribuciones originales al desarrollo de nuevo conocimiento. Se edita en formato digital bajo el ISSN en línea 2215-9045, en idioma español e inglés. Su distribución se hace desde la plataforma Open Journal System (OJS) (<http://ojs.dimar.mil.co>) y el Repositorio Biblioteca Digital Marítima (RBDM) ([Boletín Científico CIOH](http://www.cioh.org.co)). Este producto intelectual cuenta con una política de acceso abierto (Open Access, OA) para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons

AGRADECIMIENTOS

En nombre de todo el equipo editorial del Boletín Científico CIOH, expresamos un sincero agradecimiento a la Comisión Colombiana del Océano por su apoyo institucional en el desarrollo del volumen 43, números uno y dos, conmemorativo del décimo aniversario de las expediciones científicas a la Reserva de Biosfera Seaflower.

Un reconocimiento especial para el Capitán de Navío Juan Camilo Forero Hauzeur, Secretario Ejecutivo de la Comisión; al Teniente de Navío Johan Sebastián Reyes Núñez, Jefe de Asuntos Marinos y Costeros; y a la señorita Juliana Torres Acero, Coordinadora Expedición Científica Seaflower. Su compromiso y dedicación han sido piezas clave para el éxito de este volumen facilitando que se recopilen y presenten conocimientos fundamentales sobre la biodiversidad marina en la Reserva Seaflower.

Con a su colaboración, se ha enriquecido el entendimiento sobre la riqueza y la fragilidad de nuestro entorno marino, lo que inspira acciones concretas hacia la preservación de nuestro patrimonio natural.

EDITORIAL

Programa Seaflower: 10 años de investigación científica marina***Seaflower Programme: 10 years of marine scientific research***DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.645>Juan Camilo Forero Hauzeur¹

CITAR COMO:

Forero Hauzeur, J. C. (2024). Programa Seaflower: 10 años de investigación científica marina. *Boletín Científico CIOH*, 43(1), 3-4. <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.645>

Colombia es un país ampliamente reconocido en el mundo por su riqueza natural y cultural, así como por su extensa geografía, conformada por cinco regiones biogeográficas continentales que se funden con el océano Pacífico a lo largo de la costa occidental y con el océano Atlántico en su costa noreste a través del gran mar Caribe. Estas dos macrocuencas sostienen de forma directa a cerca del 39 % de la población colombiana (CCO, 2018)². Este patrimonio natural constituye un gran desafío ya que, para establecer estrategias que permitan el desarrollo económico y, a su vez, aseguren la preservación de los ecosistemas, es necesario estudiar y comprender el territorio en sus contextos económico, biológico, social y cultural.

La Comisión Colombiana del Océano (CCO) proyectó en el año 2014 el Plan Nacional de Expediciones Científicas Marinas (PNEC) como una estrategia para fortalecer la integridad y proyección territorial, el desarrollo económico, la gobernanza y el uso sostenible de los recursos, a través de la generación de conocimiento integral del territorio marino-costero de Colombia. De esta forma, con dos programas científicos -PROGRAMA SEAFLOWER Y PROGRAMA PACÍFICO-, el PNEC se basa en un modelo de cooperación intersectorial, el cual le permite al país articular los esfuerzos sectoriales necesarios para la generación de conocimiento sobre el territorio marino y costero, de tal forma que se integren las necesidades

y demandas territoriales para la toma de decisiones, las capacidades científicas y técnicas institucionales, y el conocimiento tradicional de las comunidades locales.

En virtud de lo anterior, el PROGRAMA SEAFLOWER tiene como objetivo conocer y estudiar las características físicas, químicas, biológicas y sociales del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, el cual fue declarado Reserva de Biósfera Seaflower (RBS) por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) en el marco del Programa Man and Biosphere (MAB), con el fin de preservar su diversidad biológica, ecológica y cultural. Adicionalmente, en el año 2005, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible declaró el Área Marina Protegida (AMP) Seaflower, que abarca 65 000 km². Finalmente, en 2014, el área fue asignada como Distrito de Manejo Integrado, constituyendo así la más extensa y poblada de las reservas insulares marinas del país.

La RBS cuenta con 180 000 km² y está conformada por las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, las islas Cayos del Este Sudeste, Cayos de Alburquerque, Cayos de Roncador, Cayos de Quitasueño, Cayos de Serrana, Cayos de Serranilla, Cayos de Bajo Nuevo y el banco de Bajo Alicia, y todos los demás

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8911-2524>. Capitán de navío, Secretario ejecutivo de la Comisión Colombiana del Océano. Correo electrónico: ocean@cco.gov.co

² Comisión Colombiana del Océano. (2018). Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros. PNOEC.

islotas, cayos, bancos y atolones adyacentes. Estos presentan ecosistemas de alta productividad, diversidad biológica y las extensiones más importantes de ecosistemas coralinos del territorio nacional.

El PROGRAMA SEAFLOWER es una estrategia nacional de gran valor para la generación de conocimiento científico en la RBS, que promueve el cumplimiento de los tres objetivos de las reservas de biósfera: (i) conservación de la diversidad biológica y cultural, (ii) desarrollo sostenible y (iii) apoyo logístico para la investigación y la educación. Este Programa ha garantizado que las comunidades locales participen de forma directa en su desarrollo, reconociendo el valor y la importancia de su conocimiento tradicional y de sus autoridades territoriales. El 30 % de los investigadores que han participado en las expediciones son raizales e isleños, siendo el departamento con mayor representación científica, esto garantiza que la comunidad se beneficie de los proyectos de investigación y estos sirvan como herramientas para fortalecer sus procesos de gobernanza, gestión territorial y progreso socioeconómico.

Gracias a la articulación entre los sectores defensa, ambiente, productivo, académico, privado y civil, entre otros, desde el año 2014, se han desarrollado diez expediciones científicas marinas en ocho áreas geográficas de la RBS. En estas se han desarrollado 131 proyectos de investigación sobre la biodiversidad marina y costera; el componente físico del medio marino, la cultura y la educación; la calidad ambiental marina y costera; el aprovechamiento sostenible de los recursos hidrobiológicos; la aplicación de las ingenierías y tecnologías, y las amenazas y riesgos en las áreas marinas y costeras. De esta manera han participado 95 instituciones y organizaciones del orden nacional e internacional, incluyendo 24 grupos de investigación reconocidos por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e

Innovación. Asimismo, se ha integrado el conocimiento académico de 200 investigadores con el conocimiento tradicional de 40 sabedores tradicionales de la comunidad raizal e isleña.

A través del desarrollo de las diez expediciones científicas Seaflower se han obtenido 10 796 registros biológicos pertenecientes a 13 grupos taxonómicos, de los cuales 425 son nuevos registros de especies, ya sea para las islas cayo, la RBS, el país o el Gran Mar Caribe. De esta forma, las expediciones han permitido incrementar en un 18 % el inventario de las especies marino-costeras reportadas en el archipiélago.

Con el objetivo de fortalecer los procesos de apropiación social del territorio marino y costero de la RBS, el presente volumen del BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH tiene como finalidad divulgar múltiples resultados, hallazgos y descubrimientos del PROGRAMA SEAFLOWER. Una estrategia interinstitucional que completa una década generando conocimiento científico en la RBS.

Es así como destaco el trabajo realizado por 37 investigadores, que contribuyeron con los principales resultados de sus proyectos de investigación, permitiendo conformar este interesante documento de divulgación científica, que permitirá la generación y difusión de nuevo conocimiento científico-marino de nuestro país marítimo biooceánico.

Entendiendo que el mar no solo es un cuerpo de agua, sino también una fuente vital que proporciona empleo, sustento, energía, así como desarrollo económico y social, desde la Secretaría Ejecutiva de la CCO continuamos trabajando de manera coordinada con las diferentes entidades del Gobierno nacional, la comunidad académica y la población civil, con la firme convicción de seguir contribuyendo a la consolidación de Colombia como una potencia biooceánica en beneficio de todos los colombianos.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Poliquetos (Annelida) de las islas Cayos de Alburquerque y Cayos de Serranilla, Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe Colombiano

Polychaetes (Annelida) of the Southwest Cays and Serranilla Bank, Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.628> Fecha de recepción: 2024-04-05/Fecha de aceptación: 2024-08-11

Pedro Ricardo Dueñas R.¹, Andrea Carolina Dueñas-Lagos², Néstor Hernando Campos C.³

CITAR COMO:

Dueñas, P. R.; Dueñas-Lagos, A. C.; 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),5-18. <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.628>

RESUMEN

Los poliquetos son los invertebrados marinos más abundantes, con un aporte valioso de biomasa a la cadena trófica y al equilibrio de los ecosistemas. En el Caribe colombiano las áreas con mayor deficiencia de información sobre biodiversidad marina son las insulares. Con el propósito de conocer las comunidades de poliquetos de la Reserva de la Biósfera Seaflower, en el Caribe insular colombiano, se realizaron estudios entre 2017 y 2018 en las islas Cayos de Serranilla (CS) y Cayos de Alburquerque (CA) para generar un inventario de poliquetos de estas dos áreas. Utilizando dragas, red, buceo autónomo y por apnea la recolecta en ambas islas cayos reveló un total de 30 familias, 152 géneros y 226 especies. Las familias con mayor número de especies fueron Syllidae (56 especies), Eunicidae (23 especies), Spionidae (16 especies) y Sabellidae (14 especies). El presente listado contiene 86 nuevos registros de géneros y 172 de especies de poliquetos en el Caribe colombiano.

PALABRAS CLAVE: poliquetos; RB Seaflower; Caribe; isla Cayos de Serranilla; isla Cayos de Alburquerque

ABSTRACT

Polychaetes are the most abundant marine invertebrates, with a valuable contribution of biomass to the food chain and the balance of ecosystems. In the Colombian Caribbean, the areas with the greatest lack of information on marine biodiversity are the islands. In order to understand the polychaete communities of the Seaflower Biosphere Reserve, in the Colombian insular Caribbean, studies were carried out between 2017 and 2018 in the Serranilla (CS) and Alburquerque (CA) Cays to generate an inventory of polychaetes from these two areas. Using dredges, nets, scuba diving and freediving, the collection in both cays revealed a total of 30 families, 152 genera and 226 species. The families with the highest number of species were Syllidae (56 species), Eunicidae (23 species), Spionidae (16 species) and Sabellidae (14 species). This list contains 86 new records of genera and 172 species of polychaetes in the Colombian Caribbean.

KEYWORDS: Polychaetes; Caribbean; Seaflower BR; Serranilla Cay; Alburquerque Cay.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3624-6999>. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano - Sede Santa Marta. Correo electrónico: perdura08@gmail.com

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4157-9234>. Instituto de Estudios en Ciencias del Mar, Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe. Correo electrónico: aduenas@unal.edu.co

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2510-3009>. Instituto de Estudios en Ciencias del Mar, Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe. Correo electrónico: nhcamposc@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes coralinos constituyen uno de los ecosistemas más biodiversos y productivos del planeta, proveen a la población humana una alta gama de bienes y servicios como la protección de la línea de costa y otros ecosistemas contra la erosión, ser fuente de alimento e ingresos, y la generación de ganancias económicas por buceo y turismo (Burke, Reynter, Spalding, Perry, 2011). Colombia cuenta con una extensión total de 4405 km² de áreas coralinas a nivel continental y oceánico, de las cuales un 77 % corresponden a las áreas coralinas oceánicas presentes en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, declarado por la Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación (Unesco) en el año 2000 como Reserva de la Biósfera Seaflower (RBS), título que actualmente se mantiene al ser una de las reservas marinas e insulares más extensas del planeta (Gómez-Cubillos *et al.*, 2015; Vides, Alonso, Castro y Bolaños, 2016).

La RBS comprende un conjunto de islas, cayos, bancos y bajos que poseen una riqueza significativa de especies y variedad de ambientes marinos, resaltando su importancia como reservorios de la biodiversidad en el Caribe colombiano (Díaz *et al.*, 2000; Coralina-Invemar, 2012; Vega-Sequeda, Díaz-Sánchez, Gómez-Campo, López-Londoño, Díaz-Ruiz y Gómez-López, 2015). Sin embargo, aún no se tiene un amplio conocimiento de su biodiversidad, debido a que los esfuerzos de investigación se han concentrado en ambientes someros hasta los 60 m de profundidad y en los grupos de organismos más conspicuos (Vides *et al.*, 2016), por lo que algunos invertebrados pertenecientes a las comunidades bentónicas, como los poliquetos, no alcanzan a ser tomados en cuenta para aumentar los inventarios de fauna marina de Colombia.

Los poliquetos se destacan por ser uno de los grupos de invertebrados más abundantes a nivel marino, con una gran diversidad en formas corporales, ocupación de hábitats y estrategias de vida; participan en diversos procesos en el funcionamiento del ecosistema; como fuente de alimento para grupos superiores en las cadenas tróficas, en la bioturbación, reciclaje de nutrientes y degradación de materia orgánica; a su vez, son considerados buenos bioindicadores de contaminación, especialmente de materia orgánica

y metales pesados (Rouse y Pleijel, 2001; Báez y Ardila, 2003; Dean, 2008; Martins y Barros, 2022). Pese a que los poliquetos en los ecosistemas marinos de la RBS han sido estudiados desde la década de los años 70, aún no se tiene un valor definitivo de la riqueza de especies, dado que los números siguen aumentando conforme han salido publicaciones realizadas en diversos sectores de la RBS; el registro más actualizado para esta región se encuentra en la publicación realizada por Londoño-Mesa, Montoya-Cadavid, Arteaga-Florez (2016), con 340 registros entre familias, géneros y especies. No obstante, en comparación con la cantidad de estudios realizados en la zona costera continental del Caribe colombiano, lo que se tiene para esta región insular es realmente escaso, debido a que la accesibilidad y los costos de desplazamiento juegan un papel importante a la hora de planificar expediciones oceánicas.

El gran valor ecosistémico que representan los arrecifes coralinos junto con las características geofísicas, ecológicas, culturales y económicas de la RBS hace que sea de suma importancia la continuidad en monitoreos e investigaciones para garantizar su preservación (Coralina-Invemar, 2012). En este contexto surge desde la Presidencia de la República de Colombia, en el año 2015, la iniciativa del plan de expediciones científicas liderado por la Comisión Colombiana del Océano (CCO); y en conjunto con la Armada de Colombia (ARC), la Gobernación del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina), y la Dirección General Marítima (Dimar), a través de su Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), han generado una respuesta positiva en sus convocatorias dirigidas a diversas instituciones de índole académico e investigativo, al unir sus esfuerzos para favorecer la generación de nuevos conocimientos en la RBS, lo que ha permitido fortalecer el manejo y conservación de la misma (CCO, 2015).

El presente estudio se desarrolló en dos expediciones científicas desarrolladas en las islas Cayos de Serranilla y Cayos de Alburquerque, acontecidas en los años 2017 y 2018, respectivamente; donde diversas instituciones participaron con el objetivo de fortalecer la gestión del conocimiento científico integral de la RBS con la actualización de la información de la línea base.

ÁREA DE ESTUDIO

La isla Cayos de Serranilla (CS) está localizada al norte de la RBS, entre los 15°50' y 16°04'N y los 80°03' y 79°40'O, es un banco que cubre un área de 1200 km², con presencia de pequeños cayos cercanos (West Breaker, Middle Cay, East Cay y Beacon Cay). El área somera tiene una plataforma carbonatada de unos 8 m de profundidad, con fondos compuestos por algas, esponjas, pequeñas extensiones de corales duros y algunas áreas cubiertas de pastos marinos en el sector sureste (Abril-Howard, Orozco, Bolaños, Bent, 2012; CCO, 2015) (Fig. 1).

El atolón de la isla Cayos de Albuquerque (CA) está situado a unos 35 km al suroeste de San Andrés Isla (12°10'N – 81°51'O). Es el único de los atolones de la RBS que tiene una forma casi circular, con un diámetro de más de 8 km formado por un arrecife periférico continuo a barlovento y discontinuo a sotavento. La cuenca y terraza lagunar de este atolón contienen a los cayos North Cay y South Cay, rodeados de arrecifes de parche, arena y escombros coralinos, sedimentos bioturbados con algas calcáreas, y praderas de fanerógamas; estas últimas bordean una parte del North Cay (Díaz *et al.*, 2000; CCO, 2015) (Fig. 1).

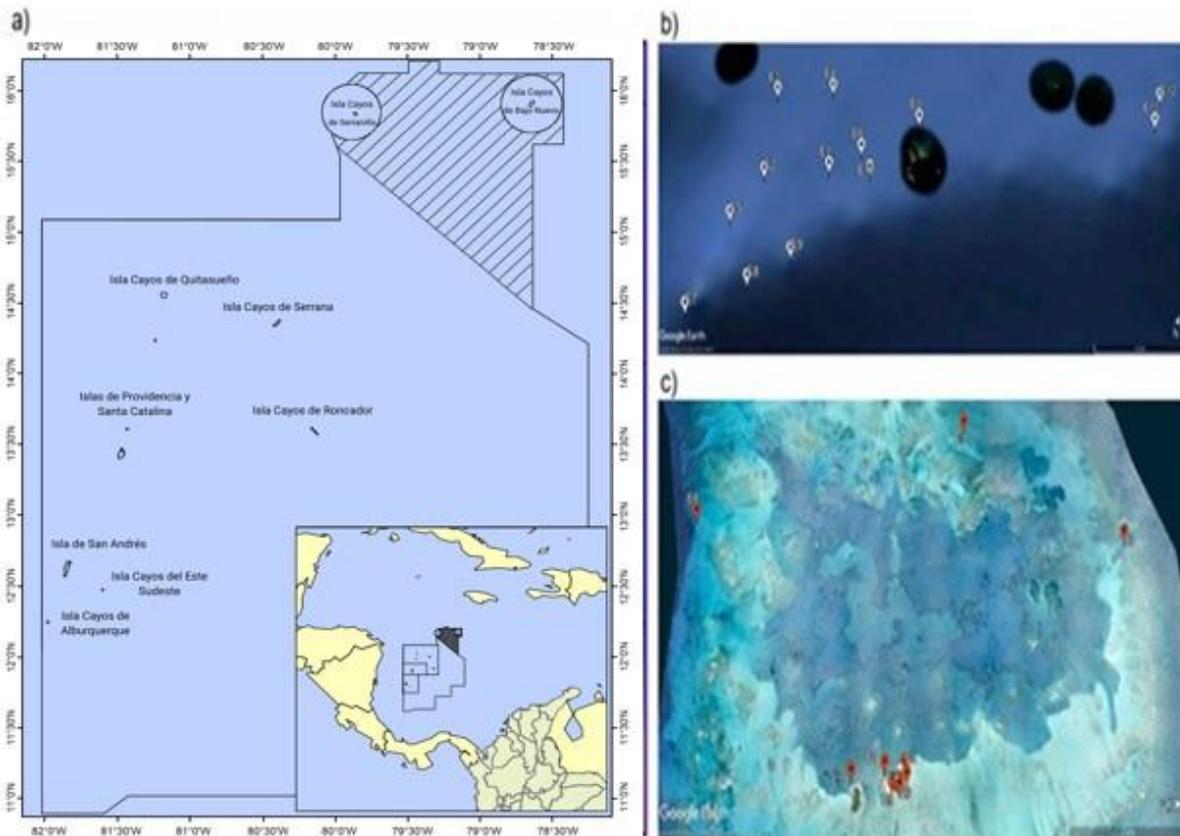


Figura 1. (a) Mapa de la Reserva de Biósfera Seaflower; **(b)** ubicación de las zonas de muestreo en la isla Cayos de Serranilla; **(c)** isla Cayos de Albuquerque. (Mapa RBS modificado de: Seaflower Foundation, 2019; imágenes con estaciones: Google Earth, 2024).

METODOLOGÍA

En todas las estaciones realizadas en CS y CA la recolección de muestras completó un área mínima de muestreo de 0.1 m², requerida para los estudios de macrofauna para fondos arenosos o lodosos (Eleftheriou, Moore, 2013). Para el almacenamiento se siguieron las metodologías incluidas en Cortés, Ruiz, Benavides (2013) para organismos de fondos blandos y en Merchán-Cepeda, Batista-Morales y Gómez-Lemus (2013) para organismos de litoral rocoso.

Isla Cayos de Serranilla

Durante septiembre de 2017, en CS y zonas aledañas se realizaron muestreos desde una embarcación en los sectores este (E11 y E12) y oeste (E0 a E10). Las muestras se recolectaron con draga Van Veen en profundidades de 10 m, 20 m y 30 m; y con una draga tipo Chipec a 320 m de profundidad en el área central de la planicie (E7) (Tabla 1). Hacia el costado oriental y occidental de CS se realizaron recorridos a manera de transecto lineal, donde se recolectaron poliquetos en el litoral rocoso en zonas del supramareal, mesolitoral e infralitoral. En algunos casos se fracturaron rocas o se empleó equipo básico de buceo para la recolecta del material biológico.

Tabla 1. Fecha, coordenadas, profundidad y tipo de draga usada en las estaciones de muestreo en la isla Cayos de Serranilla.

Fecha	Estación	Coordenadas	Profundidad	Draga
19/09/2017	E0	15° 48' 21.00"N - 79° 51' 7.56"O	12 m	Chipec
21/09/2017	E1	15° 45' 58.80"N - 79° 54' 1.62"O	22 m	Van Veen
21/09/2017	E2	15° 45' 1.98"N - 79° 56' 22.62"O	30 m	Van Veen
21/09/2017	E3	15° 47' 13.86"N - 79° 56' 52.62"O	17 m	Van Veen
21/09/2017	E4	15° 48' 2.88"N - 79° 54' 45.78"O	11.5 m	Van Veen
22/09/2017	E5	15° 43' 34.80"N - 79° 57' 6.60"O	27 m	Van Veen
20/09/2017	E6	15° 46' 50.22"N - 79° 53' 0.84"O	16 m	Van Veen
20/09/2017	E7	15° 41' 2.22"N - 79° 57' 35.52"O	323 m	Chipec
20/09/2017	E8	15° 42' 21.90"N - 79° 55' 44.64"O	28 m	Van Veen
25/09/2017	E9	15° 43' 29.58"N - 79° 54' 30.00"O	30 m	Van Veen
25/09/2017	E10	15° 46' 24.30"N - 79° 52' 28.38"O	18 m	Van Veen
25/09/2017	E11	15° 51' 19.20"N - 79° 42' 6.00"O	22 m	Van Veen
25/09/2017	E12	15° 52' 6.00"N - 79° 42' 2.40"O	20 m	Van Veen

Isla Cayos de Albuquerque

En septiembre de 2018 se realizaron los muestreos en seis estaciones someras distribuidas en los sectores de North Cay y South Cay. Mediante buceo por apnea se empleó una red de tipo manual en fondos arenosos, con marco de hierro de abertura 0.1 m², con una

malla adosada de 500 µm, y con ayuda de una lámina de plexiglás introducida entre la red y el sustrato se recolectaron las muestras. Asimismo, en cada estación se extrajeron de forma manual rocas coralinas. En las estaciones E3, E7 y E8, el método de colecta fue manual por buceo con equipo autónomo debido a la profundidad de las estaciones (Tabla 2).

Tabla 2. Fecha, coordenadas, profundidad y método de colecta de las estaciones de muestreo en la isla Cayos de Albuquerque.

Fecha	Estación	Coordenadas	Profundidad
25/09/2018	E1	12° 09' 52.50"N - 81° 50' 27.66"O	2.0 m
26/09/2018	E2	12° 09' 57.00"N - 81° 50' 27.84"O	1.1 m
26/09/2018	E3	12° 10' 24.99"N - 81° 52' 15.99"O	6.4 m
27/09/2018	E4	12° 09' 58.14"N - 81° 50' 23.94"O	1.2 m
28/09/2018	E5	12° 9' 37.74"N - 81° 50' 25.14"O	1.5 m
29/09/2018	E6	12° 09' 58.01"N - 81° 50' 21.74"O	1.5 m
30/09/2018	E7	12° 11' 45.64"N - 81° 51' 40.75"O	4.3 m
01/10/2018	E8	12° 8' 16.62"N - 81° 52' 15.99"O	18.8 m
01/10/2018	E9	12° 9' 55.38"N - 81° 50' 24.48"O	1.8 m

Almacenamiento y fijación

Las muestras de sedimentos de bentos marino en CS y CA se lavaron sobre un tamiz de ojo de malla de 500 μ m para retener la macrofauna; luego se depositaron en bolsas plásticas transparentes de calibre grueso (1 mm) y se les adicionó solución narcotizante (máximo 500 ml de Cloruro de Magnesio) para relajar a los organismos durante un periodo de 15 a 20 minutos; posteriormente, se les añadió como fijador formol al 12 % (500 ml) preparado con agua de mar, y neutralizado con bórax y rosa de bengala para tinción de tejidos y fácil observación en laboratorio.

Las rocas obtenidas manualmente en CS y CA fueron transportadas en baldes hasta la orilla, donde se fracturaron con cuidado y se extrajeron los poliquetos con ayuda de pinzas blandas; estos se colocaron en bandejas hondas de plástico con una solución de cloruro de magnesio y agua de mar para adormecerlos. Posteriormente, fueron fijados en frascos plásticos rotulados previamente y con alcohol al 96 %, debido a que algunos organismos fueron destinados a otros estudios que no se trabajaron en este documento.

En laboratorio, las muestras de ambas expediciones se lavaron con agua destilada para eliminar el formol en bandejas plásticas; se separó la macrofauna del sedimento bajo estereolupa y los poliquetos fueron almacenados en frascos plásticos, rotulados y con alcohol al 70 %. Las identificaciones a nivel de especie se llevaron a cabo con estereoscopio, microscopio y equipo de microfotografía, apoyados en las claves taxonómicas de Uebelacker y Johnson (1984), De León-González *et al.*, (2009; 2021), y Gil (2011). Para determinar la existencia de nuevos registros para el Caribe colombiano se revisaron las publicaciones sobre poliquetos realizadas por Londoño-Mesa *et al.* (2016); León, Lagos, Quiroga, Dueñas (2019) y Coneo-Gómez, Sierra-Escrigas, Dueñas-Ramírez, García-Urueña (2022).

RESULTADOS

En las expediciones realizadas en CS y CA se registraron un total de 231 organismos, distribuidos en 30 familias, 152 géneros y 226 especies (Tabla 3).

Tabla 3. Especies registradas en las expediciones a las islas Cayos de Serranilla y Cayos de Albuquerque. **NR:** nuevo registro para el Caribe colombiano; **(X)** previamente registrado en Colombia; **(**)** Nuevo registro de género y especie para el Caribe colombiano; **(*)** nuevo registro de especie para el Caribe colombiano.

N°.	Especie	CS	CA	N°	Especie	CS	CA
1	<i>Amphinome rostrata</i>		x	124	<i>Lepidametria commensalis</i> **	NR	
2	<i>Benthoscolex sp.</i>		x	125	<i>Polynoe erythrotaenia</i> **		NR
3	<i>Chloeia entypa</i> *	NR		126	<i>Subadyte mexicana</i> **	NR	
4	<i>Eurythoe complanata</i>	x		127	<i>Thormora johnstoni</i> *	NR	
5	<i>Hermodice carunculata</i>		x	128	<i>Claudrilus draco</i> **	NR	
6	<i>Hipponoe gaudichaudi</i> *		NR	129	<i>Acromegalomma fauchaldi</i> *		NR
7	<i>Linopherus paucibranchiata</i> *	NR	NR	130	<i>Anamobaea orstedii</i>		x
8	<i>Pareurythoe elongata</i> *		NR	131	<i>Bispira crassicornis</i> *	NR	
9	<i>Pareurythoe spirocirrata</i> *	NR		132	<i>Bispira melanostigma</i>	x	
10	<i>Branchiomaldane vincentii</i> **		NR	133	<i>Branchiomma curtum</i>	x	
11	<i>Amastigos delicatus</i> **		NR	134	<i>Branchiomma nigromaculatum</i>	x	
12	<i>Capitella aciculata</i> *	NR	NR	135	<i>Chone gracilis</i> *	NR	
13	<i>Capitella caribaeorum</i> *	NR		136	<i>Fabricinuda limnicola</i> **	NR	
14	<i>Capitella teres</i> *		NR	137	<i>Jasmineira bilobata</i> *	NR	
15	<i>Dasybranchethus pacifica</i> **		NR	138	<i>Notaulax nudicollis</i> *	NR	NR
16	<i>Dasybranchus lumbricoides</i>	x		139	<i>Notaulax paucoculata</i> *		NR
17	<i>Decamastus gracilis</i> *		NR	140	<i>Potamethus spathiferus</i>	x	x
18	<i>Neonotomastus glabrus</i> **	NR		141	<i>Pseudobranchiomma emersoni</i> **	NR	
19	<i>Notomastus hemipodus</i>	x		142	<i>Terebrasabella heterouncinata</i> **	NR	
20	<i>Notomastus landini</i> *		NR	143	<i>Saccocirrus major</i> **		NR
21	<i>Bhawania riveti</i> *		NR	144	<i>Hydroides mucronata</i> *	NR	
22	<i>Chrysopetalum occidentale</i> **	NR		145	<i>Pseudovermilia fuscostriata</i>	x	
23	<i>Aphelochaeta multifilis</i> *	NR		146	<i>Pseudovermilia multispinosa</i>	x	
24	<i>Cirratulus exuberans</i> *		NR	147	<i>Salmacina huxleyi</i> *	NR	
25	<i>Cirriformia afer</i> *		NR	148	<i>Siboglinum sp.</i>		x
26	<i>Cirriformia chicoi</i> *		NR	149	<i>Sthenelanelia uniformis</i>	x	
27	<i>Dodecaceria diceria</i> *		NR	150	<i>Sphaerephesia similisetis</i> **	NR	
28	<i>Dorvillea cerasina</i> *	NR		151	<i>Aonidella cirrobranchiata</i> **	NR	
29	<i>Dorvillea clavata</i> *	NR		152	<i>Aonides californiensis</i> **	NR	
30	<i>Dorvillea largidentis</i> *	NR		153	<i>Aonides paucibranchiata</i> **		NR
31	<i>Dorvillea moniloceras</i> *	NR		154	<i>Dipolydora giardi</i> **		NR
32	<i>Dorvillea rubra</i> *	NR		155	<i>Dipolydora socialis</i> **	NR	
33	<i>Dorvillea sociabilis</i> *	x		156	<i>Dispio lenislamellata</i> **		NR
34	<i>Parougia batia</i> **	NR		157	<i>Lindaspio dibranchiata</i> **		NR
35	<i>Eunice brevis</i> *	NR		158	<i>Malacoceros cariacensis</i> *		NR
36	<i>Eunice collini</i> *	NR		159	<i>Microspio paradoxa</i> **	NR	
37	<i>Eunice filamentosa</i>	x		160	<i>Polydora ciliata</i> *	NR	
38	<i>Eunice fucata</i> *		NR	161	<i>Polydora heterochaeta</i> *	NR	
39	<i>Eunice gazzoi</i>	x		162	<i>Prionospio vermillionensis</i> *		NR

Nº.	Especie	CS	CA	Nº	Especie	CS	CA
40	<i>Eunice hartmanae</i> *	NR		163	<i>Pygospio elegans</i> **		NR
41	<i>Eunice hawaiiensis</i>	x		164	<i>Rhynchospio harrisae</i> **		NR
42	<i>Eunice imogena</i> *	NR		165	<i>Scolelepis andradei</i> *		NR
43	<i>Eunice kinbergi</i>		x	166	<i>Xandaros acanthodes</i> **		NR
44	<i>Eunice lanai</i> *	NR		167	<i>Amblyosyllis lineata</i> *	NR	
45	<i>Eunice pulvinopalpata</i> *	NR		168	<i>Amblyosyllis madreinsis</i> *		NR
46	<i>Eunice rubrivittata</i> *	NR		169	<i>Branchiosyllis diazi</i>		x
47	<i>Eunice semisegregata</i>	x	x	170	<i>Branchiosyllis exilis</i> *	NR	
48	<i>Eunice stigmatura</i> *	NR		171	<i>Branchiosyllis pacifica</i> *	NR	
49	<i>Eunice tenuis</i> *	NR		172	<i>Brania russelli</i> **	NR	
50	<i>Eunice vittatopsis</i> *		NR	173	<i>Brevicirrosyllis weismanni</i> **		NR
51	<i>Leodice antennata</i>	x		174	<i>Dentatisyllis carolinae</i> **	NR	NR
52	<i>Leodice rubra</i>		x	175	<i>Dentatisyllis mangalis</i> **	NR	NR
53	<i>Lysidice collaris</i>	x		176	<i>Dentatisyllis morrocoyensis</i> **	NR	
54	<i>Lysidice ninetta</i>	x		177	<i>Dioplosyllis octodentata</i> **		NR
55	<i>Lysidice unicornis</i>	x	x	178	<i>Eusyllis assimilis</i> **	NR	
56	<i>Nicidion angeli</i> *	NR		179	<i>Eusyllis blomstrandii</i> **	NR	
57	<i>Nicidion longula</i>	x		180	<i>Eusyllis spiocirrata</i> **	NR	
58	<i>Glycera brevicirris</i> *	NR		181	<i>Exogone arenosa</i> **	NR	
59	<i>Glycera lapidum</i> *		NR	182	<i>Exogone dispar</i> **	NR	
60	<i>Glycera oxicephala</i> *	NR		183	<i>Exogone longicornis</i> **	NR	
61	<i>Glycera papillosa</i> *	NR		184	<i>Exogone naidinoides</i> **		NR
62	<i>Glycera tessellata</i>	x		185	<i>Haplosyllides floridiana</i> **		NR
63	<i>Goniada teres</i>	x		186	<i>Haplosyllis agelas</i> *	NR	
64	<i>Hesiocaeca bermudensis</i> **		NR	187	<i>Haplosyllis spongicola</i>	x	
65	<i>Heteropodarke formalis</i> **		NR	188	<i>Inermosyllis curacaoensis</i>	x	
66	<i>Leocrates atlanticus</i> **	NR		189	<i>Inermosyllis mexicana</i> *	NR	NR
67	<i>Leocrates longocirratu</i> **	NR		190	<i>Myrianida brevipes</i> *	NR	
68	<i>Syllidia armata</i> **		NR	191	<i>Nuchalosyllis lamellicornis</i> **	NR	
69	<i>Syllidia liniata</i> **	NR		192	<i>Nudisyllis divaricata</i> **	NR	
70	<i>Abyssoninoe hibernica</i> **	NR		193	<i>Opisthodonta mitchelli</i> **	NR	
71	<i>Abyssoninoe sp.</i> *		NR	194	<i>Opisthosyllis arboricola</i> *		NR
72	<i>Eranno lagunae</i> **	NR		195	<i>Paraehlersia ferrugina</i> **	NR	
73	<i>Gallardoneri nonatoi</i> **	NR		196	<i>Parapionosyllis floridana</i> **	NR	
74	<i>Lumbricalus campoyi conf.</i> **		NR	197	<i>Parapionosyllis longicirrata</i> **	NR	
75	<i>Lumbrinerides uebelackerae</i> **		NR	198	<i>Parapionosyllis uebelackerae</i> **	NR	
76	<i>Paraninoe brevipes</i> **	NR		199	<i>Parasphaerosyllis indica</i> **	NR	
77	<i>Axiothella somersi</i> **		NR	200	<i>Parexogone exmouthensis</i> **		NR
78	<i>Notoproctus sp.</i> *		NR	201	<i>Parexogone longicirris</i> **		NR
79	<i>Clymenella torquata</i>		x	202	<i>Perkinsyllis spinisetosa</i> **	NR	
80	<i>Euclymene coronata</i> *		NR	203	<i>Plakosyllis brevipes</i> **		NR
81	<i>Euclymene rubrocincta</i> *		NR	204	<i>Prosphaerosyllis sotoi</i> **		NR

N°.	Especie	CS	CA	N°	Especie	CS	CA
82	<i>Heteroclymene glabra</i> **		NR	205	<i>Pseudosyllis brevipennis</i> **	NR	NR
83	<i>Isocirrus reticulatus</i> **		NR	206	<i>Salvatoria euritmica</i> **	NR	NR
84	<i>Maldane sarsi</i>	x		207	<i>Salvatoria vieitezi</i> **		NR
85	<i>Maldanella fibrillata</i> **		NR	208	<i>Syllides bansei</i> **	NR	
86	<i>Aglaophamus foliosa</i> *	NR		209	<i>Syllides fulvus</i> **	NR	NR
87	<i>Alitta succinea</i>		x	210	<i>Syllis adamantea</i> *		NR
88	<i>Ceratonereis mirabilis</i>	x	x	211	<i>Syllis castroviejo</i> *	NR	NR
89	<i>Leonnates decipiens</i> **	NR		212	<i>Syllis fasciata</i>		x
90	<i>Micronereis piccola</i> **	NR		213	<i>Syllis gracilis</i>		x
91	<i>Neanthes acuminata</i>	x	x	214	<i>Syllis hyalina</i>	x	
92	<i>Neanthes unifasciata</i> *	NR		215	<i>Syllis pectinans</i> *		NR
93	<i>Nereis casoae</i> *	NR		216	<i>Syllis truncata</i> *	NR	NR
94	<i>Nereis sp.</i>		x	217	<i>Syllis vivipara</i> *	NR	
95	<i>Platynereis dumerilii</i>	x	x	218	<i>Trypanedenta gemmipara</i>	x	x
96	<i>Arabella mutans</i>	x		219	<i>Trypanosyllis vittigera</i>	x	
97	<i>Diopatra cuprea</i>		x	220	<i>Trypanosyllis inglei</i> *	NR	
98	<i>Diopatra papillata</i> *	NR		221	<i>Trypanosyllis parvidentata</i>	x	x
99	<i>Hyalinoecia bermudensis</i> *		NR	222	<i>Xenosyllis scabra</i> **	NR	
100	<i>Mooreonuphis elsiae</i> **	NR		223	<i>Eupolymnia magnifica</i>		x
101	<i>Mooreonuphis nebulosa</i> **		NR	224	<i>Loimia medusa</i>		x
102	<i>Nothria occidentalis</i> *		NR	225	<i>Paraxionice artifex</i> **	NR	
103	<i>Onuphis elegans</i> *	NR		226	<i>Pista palmata</i>	x	
104	<i>Rhaphobranchium agassizi</i> **		NR	227	<i>Polycirrus holthei</i> *	NR	
105	<i>Armandia agilis</i>		x	228	<i>Polycirrus purpureus conf.</i> *	x	x
106	<i>Ophelia limacina</i> **		NR	229	<i>Streblosoma hartmanae</i>	x	
107	<i>Ophelia abranchiata</i> *		NR	230	<i>Thelepus setosus</i>	x	
108	<i>Ophelia acuminata</i> *	NR	NR	231	<i>Thelepus verrilli</i> *	NR	
109	<i>Ophelia alata</i> *		NR				
110	<i>Ophelia cylindricaudata</i> *	NR					
111	<i>Ophelia hachaensis</i>		x				
112	<i>Polyophthalmus pictus</i>	x	x				
113	<i>Hypereteone lactea</i> *	NR					
114	<i>Nereiphylla fragilis</i>	x					
115	<i>Paranaitis speciosa</i> **	NR					
116	<i>Cabira incerta</i> *	NR					
117	<i>Litocorsa acuminata</i> *	NR					
118	<i>Litocorsa antennata</i> *	NR					
119	<i>Antioe uschakovi</i> **	NR					
120	<i>Chaetacanthus pilosus</i>	x					
121	<i>Eunoe eura</i> **	NR					
122	<i>Harmothoe crucis</i>	x					
123	<i>Hermeria verruculosa</i> **	NR					

Los resultados de las expediciones muestran una abundancia similar de familias, géneros y especies de poliquetos entre ambas zonas de la RBS, donde en CS se hallaron 20 familias,

83 géneros y 150 especies; mientras en CA se hallaron 27 familias, 90 géneros y 103 especies fueron registradas (Fig. 2).

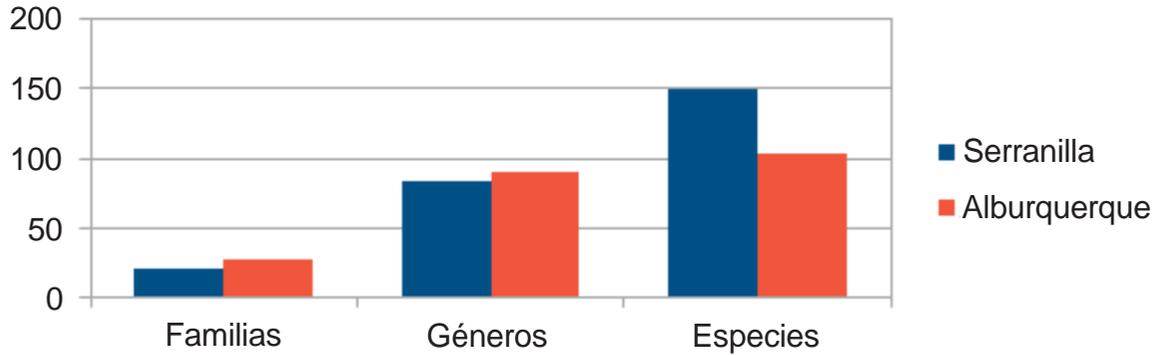


Figura 2. Número de registros de poliquetos encontrados en las expediciones Seaflower en isla Cayos de Serranilla e isla Cayos de Albuquerque.

En cuanto a las familias de poliquetos, el mayor número de especies registradas para ambos cayos fue proporcionado por la familia Syllidae (56 especies), seguido de las familias

Eunicidae (23 especies), Spionidae (16 especies) y Sabellidae (15 especies). Las familias restantes obtuvieron un menor número de registros (n = <10) (Fig. 3).

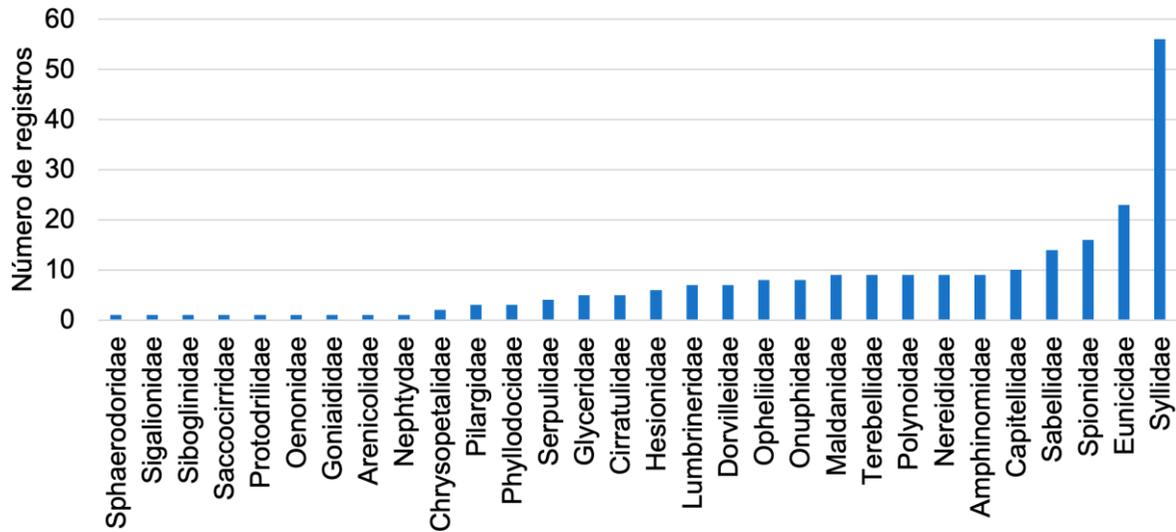


Figura 3. Número de registros por familias de poliquetos encontrados en las expediciones Seaflower en islas Cayos Serranilla e islas Cayos de Albuquerque.

Se reportaron 86 nuevos registros de géneros y especies para el Caribe colombiano (37.2 % del total de lo encontrado en las expediciones) distribuidos entre las familias Arenicolidae, Capitellidae, Chrysopetalidae, Dorvilleidae, Hesionidae, Lumbrineridae,

Maldanidae, Nereididae, Onuphidae, Opheliidae, Phyllodocidae, Polynoidae, Protodrilidae, Sabellidae, Saccociridae, Sphaerodoridae, Spionidae, Syllidae y Terebellidae, algunas de ellas presentes en las figuras 4 y 5.

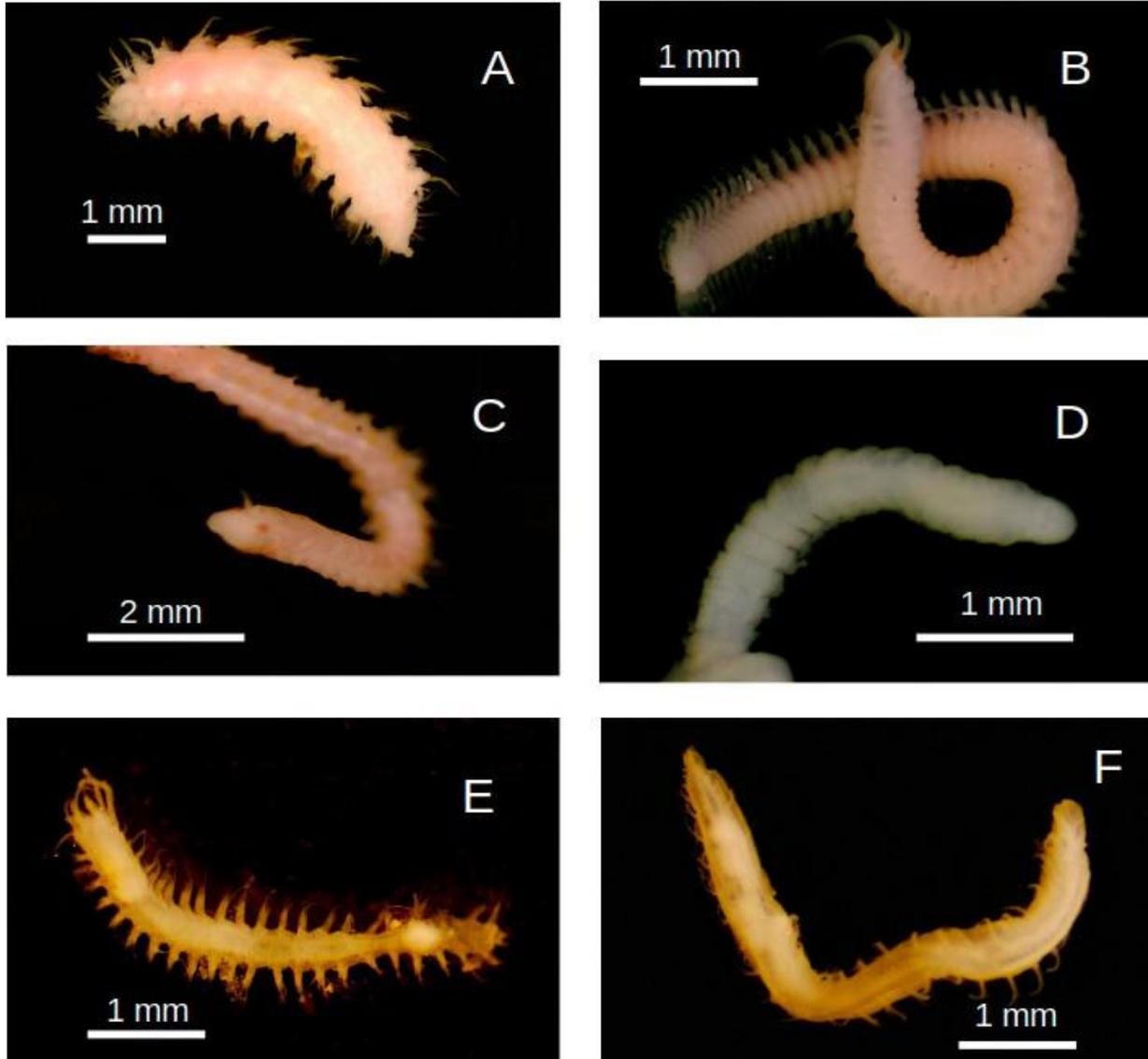


Figura 4. **A)** Amphinomidae, *Eurythoe complanata*; **B)** Dorvilleidae, *Dorvillea sociabilis*; **C)** Eunicidae, *Lysidice collaris*; **D)** Lumbrineridae, *Lumbrinereis nonatoi*; **E)** Nereididae, *Platinereis dumerilii*; **F)** Opheliidae, *Ophelina cylindrica*.

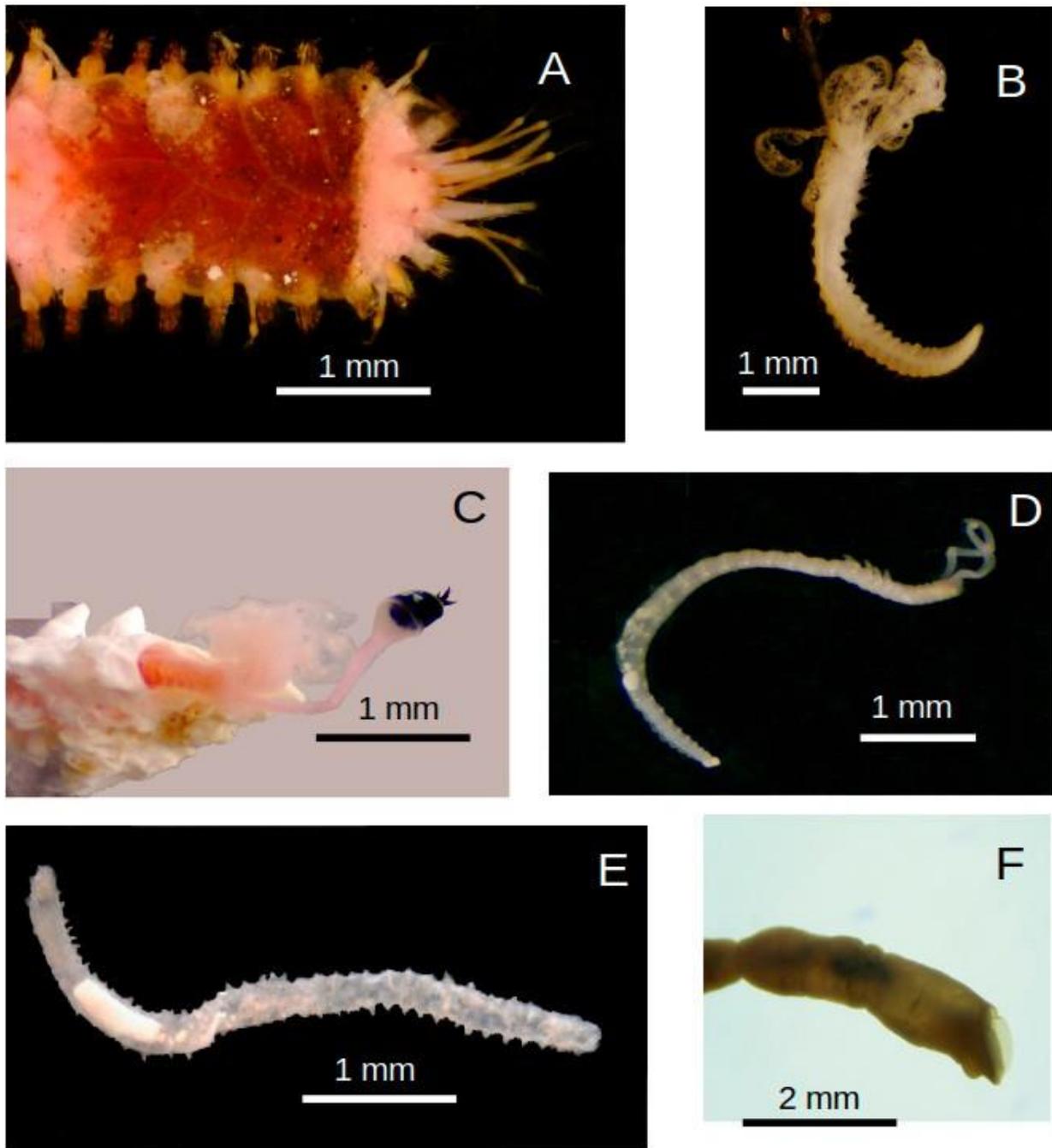


Figura 5. **A)** Polynoidae, *Eunoe eura*; **B)** Sabellidae, *Branchiomma curtum*; **C)** Serpulidae, *Pseudovermilia multispinosa*; **D)** Spionidae, *Polydora ciliata*; **E)** Syllidae, *Haplosyllis spongicola*; **F)** Maldanidae, *Maldane sarsi*.

DISCUSIÓN

Londoño-Mesa *et al.*, (2016) registraron para la RBS 49 familias, 66 géneros y 131 especies de poliquetos (Annelida), provenientes en su mayoría de los sectores de las islas de San

Andrés, Providencia y Santa Catalina, donde se ha concentrado el mayor número de investigaciones; mientras que para el Caribe colombiano estaban registradas 51 familias, 230 géneros y 297 especies (Coneo-Gómez *et al.*, 2022). El presente estudio aporta a ese listado 86 géneros y 172

especies, demostrando lo valiosas que son las expediciones a ecosistemas coralinos insulares como son los de la RBS.

Las tres familias con mayor número de especies cuentan con una amplia distribución global y pueden ser encontrados en todo tipo de sustratos, en el caso de los Syllidae, debido a su diminuto tamaño son muy dominantes en las comunidades bentónicas, colonizando sustratos suaves y duros muy variados como arena, rocas, corales vivos y muertos, macroalgas y pastos marinos, entre otros. (De León-González *et al.*, 2021).

Llama la atención que en las familias Arenicolidae, Goniadidae, Nephtyidae, Oeonidae, Protodrilidae, Saccocirridae, Siboglinidae, Sigalionidae y Sphaerodoridae, solo se recolectó un ejemplar de cada una de ellas, confirmando la tendencia de que en estos ecosistemas de alta diversidad hay más riqueza que abundancia.

CONCLUSIONES

La alta diversidad de poliquetos presentes en la RBS se debe en gran parte a ser una zona reconocida como *hot spot* de biodiversidad (Dean, 2008), poco intervenida y de acceso restringido, contrario a las áreas litorales continentales de fácil visita.

Se registran en total 30 familias, 152 géneros y 226 especies, de estas 8 familias, 18 géneros y 20 especies están presentes en los dos cayos; 86 géneros y 172 especies son registros nuevos para el Caribe colombiano.

El objetivo principal de levantar un inventario de poliquetos bentónicos marinos para las islas Cayos de Serranilla y Cayos de Alburquerque se consiguió. Además, se aportan nuevos géneros y especies que a la fecha se desconocían para el Caribe colombiano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a las instituciones organizadoras de las expediciones: la ARC, la Dimar, la CCO, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), a través de su programa Colombia BIO, la Gobernación de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y Coralina.

Igualmente, a la Sede Caribe de la Universidad Nacional de Colombia por la financiación del personal y equipo científico desplazado.

FUENTE FINANCIADORA

Esta investigación se adelantó en el marco de las expediciones Seaflower, coordinadas por la CCO; la participación de los investigadores fue financiada por la Sede Caribe de la Universidad Nacional de Colombia, a través de los proyectos 'Caracterización de la epifauna y macrobentos (0 m - 800 m) de isla Cayos de Serranilla y áreas adyacentes' y 'Valoración de servicios ecosistémicos y diversidad biológica de los arrecifes de coral en los alrededores de la isla Cayos de Alburquerque, Reserva de Biósfera Seaflower, Caribe'.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: N. H. C.; metodología: N. H. C. y A. D. L.; análisis: N. H. C., A. D. L. y P. R. D.; investigación: N. H. C., A. D. L. y P. R. D.; recursos: N. H. C.; curación de datos: P. R. D.; redacción y preparación del borrador original: P. R. D.; redacción, revisión y edición: P. R. D., N. H. C. y A. D. L.; administración del proyecto: N. H. C.; consecución de fondos: N. H. C. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril-Howard, A.; Orozco, C.; Bolaños, N.; Bent, H. (2012). Primera aproximación al conocimiento de las comunidades coralinas de los complejos arrecifales de Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo, Colombia, sección norte de la Reserva de Biósfera Seaflower, Caribe Occidental. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 4: 51-65. ISSN 1659-455X. <https://doi.org/10.15359/revmar.4.3>
- Báez, D. P.; Ardila, N. E. (2003). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) del Mar Caribe colombiano. *Biota Colombiana*, 4(1): 89-109. ISSN 2539-200X.
- Burke, L.; Reytar, K.; Spalding, M.; Perry, A. (2011). *Reef at Risk revisited*. Washington D. C., World Resources Institute. The Nature Conservancy (TNC), the World Fish Center, the International Coral Reef Action Network

- (ICRAN), the United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), and the Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN). Washington, D. C. 130 pp. <https://bvearmb.do/handle/123456789/1787>
- Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Aportes al conocimiento de la Reserva de Biósfera Seaflower*. Comisión Colombiana del Océano, Bogotá D. C., Colombia. 104 pp. ISBN 978-958-58192-9-0.
- Coneo-Gómez, S.; Sierra-Escrigas, S.; Dueñas-Ramírez, P. R.; García-Urueña, R. (2022). Nuevos registros de Anélidos del Banco de Las Ánimas, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 51 (1): 9-36 <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2022.51.1.1083>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis”; Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, (2012). Gómez-López, D. I.; Segura-Quintero, C.; Sierra-Correa, P. C.; Garay-Tinoco, J. (Eds.) *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Invenmar-Coralina. Serie de Publicaciones Especiales de Invenmar N°. 28. Santa Marta, Colombia. 180 pp. ISBN 978-958-8448-50-3
- Cortés, F. A.; Ruiz, J. A.; Benavides, M. (2013). Fondos blandos. En: Báez-Polo, A (Ed.). *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales* (pp. 101-123). Invenmar-ANH. Santa Marta, Colombia. 212 pp.
- De León-González, J. A.; Bastida-Zavala, J. R.; Carrera-Parra, L. F.; García-Garza, M. E.; Peña-Rivera, A.; Salazar-Vallejo, S. I.; Solís-Weiss, V. (Eds.). (2009). *Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México y América Tropical*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, 350.
- De León-González J. A.; Bastida-Zavala, J. R.; Carrera-Parra, L. F.; García-Garza, M. E.; Salazar-Vallejo, S. I.; Solís-Weiss, V.; Tovar-Hernández, M.A. (Eds.). (2021). *Anélidos Marinos de México y América Tropical*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, 1054 pp.
- Dean, H. K. (2008). The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: A review. *Revista de Biología Tropical*, 56(4): 11-38. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i4.27162>
- Díaz, J. M.; Barrios, L. M.; Cendales, M. H.; Garzón-Ferreira, J.; Geister, J.; López-Victoria, M.; Ospina, G. H.; Parra, F. J.; Pinzón, J.; Vargas-Ángel, B.; Zapata, F. A.; Zea, S. (2000). Áreas coralinas de Colombia. Invenmar. Serie Publicaciones Especiales N°. 5. Santa Marta, Colombia. 176 pp. ISBN 958-95950-8-1
- Eleftheriou, A.; Moore, D. C. (2013). Macrofauna Techniques. En: Eleftheriou, A (Eds.), *Methods for the study of marine benthos* (4° ed., pp. 175-251). Editorial Wiley-Blackwell. UK. 502 pp. ISBN 978-1-118-54237-8. <https://doi.org/10.1002/9781118542392.ch5>
- Gil, J. (2011). *The European Fauna of Annelida Polychaeta*. Tesis doctoral Universidad de Lisboa. 1554 pp.
- Gómez-Cubillos, M. C.; Licero, L.; Perdomo, L.; Rodríguez, A.; Romero, D.; Ballesteros-Contreras, D.; Gómez-López, D.I.; Melo, A.; Chasqui, L.; Ocampo, M. A.; Alonso, D.; García, J.; Peña, C.; Bastidas, M.; Ricaurte, C. (2015). *Portafolio "Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia"*. Serie de Publicaciones Generales del Invenmar N°. 79, Santa Marta. 69 p. ISBN 978-958-8448-96-1.
- León, M. V.; Lagos, A. M.; Quiroga, S.; Dueñas, P. R. (2019). Poliquetos de la costa Caribe en Colombia: una lista de chequeo actualizada y algunas anotaciones taxonómicas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(169): 646-652. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.802>
- Londoño-Mesa, M.; Montoya-Cadavid, E.; Arteaga-Flórez, C. (2016). Gusanos marinos (Poliquetos) de la Reserva de Biósfera Seaflower. En: Vides, M., Alonso D., Castro, E. y Bolaños, N (Eds.). *Biodiversidad del mar*

- de los siete colores* (pp. 96-109). Invemar – Coralina. Serie de Publicaciones Generales N°. 84 del Invemar. Santa Marta, Colombia. 228 pp. ISBN 978-958-8935-14-0.
- Martins, A.; Barros, F. (2022). Ecological functions of polychaetes along estuarine gradients. *Frontiers in Marine Science*. Vol. 9. 14 pp. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.780318>
- Merchán-Cepeda, A.; Batista-Morales, A.; Gómez-Lemus, L. A. (2013). Litoral rocoso. En: Báez-Polo, A (Ed.). *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales* (pp. 155-171). Invemar-ANH. Santa Marta, Colombia. 212 pp.
- Rouse, G.; Pleijel, F. (2001). *Polychaetes*. Oxford University Press. New York. 354 pp. ISBN 978-0198506089.
- Seaflower Foundation. (2019). *La Reserva de Biósfera Seaflower*. <https://seaflowerfoundation.org/reserva-de-la-biosfera.html>.
- Uebelacker, J. M.; Johnson, P.G. (1984). *Taxonomic guide to the polychaetes of the northern Gulf of Mexico*. Minerals Management Service U.S. Depart. Interior, Mobile. 202 pp.
- Vega-Sequeda, J.; Díaz-Sánchez, C. M.; Gómez-Campo, K.; López-Londoño, T. ; Díaz-Ruiz, M.; Gómez-López, D. I. (2015). Biodiversidad marina en Bajo Nuevo, Bajo Alicia y Banco Serranilla, Reserva de Biósfera Seaflower. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 44(1): 199-224. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.27>
- Vides, M.; Alonso, D.; Castro, E.; Bolaños, N. (Eds.). (2016). *Biodiversidad del mar de los siete colores*. Invemar y Coralina. Serie de Publicaciones Generales del Invemar N°. 84. 228 pp. ISBN 978-958-8935-14-0

RESEARCH ARTICLE

Contribución al conocimiento de la riqueza de fitoplancton en la isla Cayos de Serranilla, Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe Colombiano*Contribution to the knowledge of phytoplankton richness in Serranilla Bank, Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.631>

Date received: 24/04/2024 / Date accepted: 15/08/2024

Emanuela Razza¹, Tiziana Romagnoli², Brigitte Gavio³

CITATION:

Razza, E.; Romagnoli, T.; Gavio, B. (2024). Contribución al conocimiento de la riqueza de fitoplancton en la isla Cayos de Serranilla, Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 43(1): 19-30. ISSN online 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.631>

ABSTRACT

The Archipelago of San Andrés, Providencia y Santa Catalina, declared Seaflower Biosphere Reserve in 2000, has a marine extension of about 300,000 km² in the Caribbean Sea. In its northernmost part, there is Serranilla Bank, an ancient atoll formed by small, emerged cays and a marine extension of about 1,200 km², 400 km north of San Andres Island. Most of its marine extension includes deep water, but there is a shallow platform on the southwestern part of the bank. Due to its isolation and its distance to the closest inhabited islands of the Archipelago (San Andres and Old Providence islands), it is one of the least studied regions of the Reserve. In September 2017, the Colombian Ocean Commission (CCO) organized a scientific expedition to Serranilla, to start studying its biodiversity and the ecological processes governing its ecosystems. Among the goals of the expedition, there was the characterization of the phytoplankton community in shallow water. Samples were taken with a phytoplankton net with a mesh size of 27 mm. The samples were taken vertically, from the bottom to the surface of the water at 13 sampling points. Water samples were preserved in transeau solution and observed at optical inverted microscope after sedimentation. A total of 28 genera of diatoms and 8 genera of dinoflagellates were identified. Among the species observed in most samples there are *Bleakeleya notata*, *Nitzschia longissima*, *Striatella unipunctata*, *Podolampas palmiper* and *Triplos teres*.

KEYWORDS: Phytoplankton, richness, diatoms, Serranilla Bank, Seaflower Biosphere Reserve.

RESUMEN

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, declarado Reserva de Biósfera Seaflower en el año 2000, tiene una extensión marina de unos 300.000 km² en el mar Caribe. En su parte más septentrional, se encuentra el Cayo Serranilla, un antiguo atolón formado por pequeños cayos emergidos y una extensión marina de unos 1.200 km², 400 km al norte de la isla de San Andrés. La mayor parte de su extensión marina incluye aguas profundas, pero hay una plataforma somera en la parte suroccidental del cayo. Debido a su aislamiento y a su distancia de las islas habitadas más

¹ ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4779-543X>. Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131 Ancona, Italia. Correo electrónico: manu-frm@hotmail.it

² ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5181-987X>. Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131 Ancona, Italia. Correo electrónico: t.romagnoli@staff.univpm.it

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5364-3374>. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: bgavio@unal.edu.co

cercanas del Archipiélago (islas de San Andrés y Providencia), es una de las regiones menos estudiadas de la Reserva. En septiembre de 2017, la Comisión Colombiana del Océano (CCO) organizó una expedición científica a la isla Cayos de Serranilla, para comenzar a estudiar su biodiversidad y los procesos ecológicos que rigen sus ecosistemas. Entre los objetivos de la expedición, se encontraba la caracterización de la comunidad de fitoplancton en aguas poco profundas. Las muestras se tomaron verticalmente con una red de fitoplancton con un tamaño de malla de 27 mm, desde el fondo hasta la superficie del agua, en 13 puntos de muestreo. Las muestras de agua fueron preservadas en una solución Transeau y se observaron en un microscopio óptico invertido después de la sedimentación. Se identificaron un total de 28 géneros de diatomeas y 8 géneros de dinoflagelados. Entre las especies observadas se reportan *Bleakeleya notata*, *Nitzschia longissima*, *Striatella unipunctata*, *Podolampas palmiper* y *Tripes teres*.

PALABRAS CLAVE: Fitoplancton, riqueza, diatomeas, isla Cayos de Serranilla, Reserva de la Biósfera Seaflower

INTRODUCCIÓN

El mar Caribe es el mar adyacente más grande del océano Atlántico. Está delimitado por la costa de Centroamérica al oeste, la costa norte de Colombia y Venezuela al sur, la península de Yucatán al norte y el arco antillano al norte y al este. El área está dividida en nueve ecoprovincias (Spalding *et al.*, 2007). El mar Caribe es considerado una cuenca oligotrófica con evidencia de limitación de nitrógeno para los sistemas planctónicos (Margalef, 1969; Corredor, Howarth, Twilley y Morell, 1999).

La cuenca está influenciada por la descarga de los ríos Orinoco y Amazonas, en el Caribe oriental, y el río Magdalena en la porción sur (Sheng y Tang, 2003). Además, el afloramiento local a lo largo de la costa de Venezuela y Colombia contribuye estacionalmente al aporte de nutrientes a los ambientes costeros (Rodríguez y Cróquer, 2008; Eidens, Bayraktarov, Pizarro, Wilke y Wild, 2012). A través de los penachos fluviales y la escorrentía de los ríos, los sedimentos y los nutrientes han ingresado históricamente a la cuenca del Caribe, pero el aumento de las cargas desde principios de la década de 1980 continúa impactando los ecosistemas costeros (Restrepo, Zapata, Díaz, Garzón-Ferreira y García, 2006). La industrialización, la agricultura intensiva y la deforestación han llevado a un aumento en el aporte de nutrientes (Heileman, 2007), que llegan a los ecosistemas costeros. Por lo tanto, partes de la cuenca están experimentando eutrofización, especialmente las cercanas a la costa. Lejos de la costa y de los vertidos industriales, el agua sigue siendo considerada oligotrófica.

El mar Caribe alberga alrededor de 15 de los 425 atolones que hay en todo el mundo (Díaz,

Sánchez, Zea y Garzón-Ferreira, 1996). La mayoría de ellos están relativamente cerca de la costa (por ejemplo, Los Roques, en Venezuela, a unos 130 km de tierra firme; Glover's Reef en Belice, a unos 45 km de la costa). El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina incluye algunos atolones oceánicos, que están lejos de las tres islas habitadas del archipiélago y aislados de la costa continental. Entre estos atolones, en la parte más septentrional del archipiélago, se encuentra Cayo Serranilla, que está aproximadamente a 325 km al noreste de Providencia y a 280 km al suroeste de Jamaica. Este atolón, junto con los bajos Nuevo y Alicia, que también son parte del archipiélago, son los atolones más aislados del mar Caribe. En esta zona, ni los penachos de los ríos Orinoco, Amazonas o Magdalena tienen impacto sobre el agua, ni los vertidos industriales o agrícolas, como tampoco los asentamientos humanos cercanos influyen directamente en su concentración de nutrientes (Beier, Bernal, Ruiz-Ochoa y Barton, 2017).

Debido a su distancia de la costa continental colombiana, y también de otras islas habitadas del archipiélago, Serranilla ha recibido muy poca atención desde el punto de vista científico, por lo tanto, es una de las zonas menos conocidas del mar Caribe. En 2009, CORALINA organizó una expedición a los bajos Serranilla, Alicia y Nuevo para determinar la variabilidad genética del gasterópodo *Aliger gigas* L. 1758, una importante especie comercial. En 2010, CORALINA y el Gobierno local organizaron otra expedición a la misma zona con el objetivo de caracterizar por primera vez los ensamblajes bentónicos (cobertura de corales y macroalgas, presencia de enfermedades coralinas) y la comunidad de peces (Abril-Howard, Orozco-Toro, Bolaños-Cubillos

y Bent-Hooker, 2012; Bolaños-Cubillos, Abril-Howard, Bent-Hooker, Caldas y Acero, 2015). En 2011, INVEMAR organizó una nueva expedición a las mismas localidades para caracterizar los hábitats marinos (Vega-Sequeda, Díaz-Sánchez, Gómez-Campo, López-Londoño, Díaz-Ruiz & Gómez-López, 2015), incluyendo la comunidad planctónica (Gutiérrez-Salcedo, Cabarcas-Mier & Suárez-Mozo, 2015). En 2017, la Comisión Colombiana del Océano, con la colaboración de Dimar, Colciencias, la Armada de Colombia y el CIOH, organizó la Expedición Científica *Seaflower* 2017 a Serranilla, para estudiar diferentes aspectos de los hábitats marinos del atolón, como los ensambles de peces asociados al arrecife coralino, la riqueza de macroalgas en ambientes bentónicos y la estimación de los servicios ecosistémicos del arrecife coralino de Serranilla.

Uno de los principales componentes biológicos del medio pelágico es el plancton, que está formado por organismos autótrofos (fitoplancton) y heterótrofos (zooplancton). El plancton es importante porque regula los flujos de energía a lo largo de las redes tróficas en el medio ambiente pelágico y también en los ecosistemas costeros (Gutiérrez-Salcedo *et al.*, 2015).

Durante la Expedición Científica *Seaflower* 2017, se recolectaron algunas muestras de redes fitoplánctonas para contribuir al conocimiento de este grupo en esta remota zona del mar Caribe.

MATERIALES Y MÉTODOS

La isla Cayos Serranilla es un antiguo atolón situado entre las coordenadas 15°47'-52'N y 79°45'-80°03'O (Fig. 1). Forma parte del Área

de Régimen Conjunto Jamaica-Colombia, creada a través del tratado Sanín-Robertson en 1993. En el año 2000, todo el archipiélago fue declarado Reserva de la Biósfera por la UNESCO, y Serranilla fue incluida en la Reserva. Tiene 40 km de largo y 32 km de ancho. Tiene una superficie aproximada de 1.100 km² y se caracteriza por una plataforma de carbonato, que se encuentra casi en su totalidad en aguas profundas. Pequeñas islas emergen del agua, siendo Cayo Beacon la más grande. En este lugar, hay un faro y un puesto permanente del Ejército colombiano para garantizar la soberanía territorial. El arrecife de coral tiene unos 23 km de largo y está fraccionado por pequeños canales, que pueden experimentar turbulencias y fuertes corrientes (Abril-Howard *et al.*, 2012).

Las corrientes oceánicas superficiales alrededor de Serranilla están dominadas por la corriente del Caribe. Durante la estación seca (diciembre-abril), la corriente fluye hacia el oeste, mientras que en la estación húmeda (agosto-noviembre) su dirección es más variable. El período comprendido entre los meses de mayo y julio es una estación de transición entre seca y húmeda, con precipitaciones ocasionales. La temperatura es relativamente uniforme durante todo el año, con una temperatura media anual del aire de 26,7°C. Los vientos soplan principalmente en dirección este-noreste con velocidades medias mensuales que oscilan entre 3,2 y 6,2 m/s (Edit y Andrade, 2011).

El muestreo se llevó a cabo entre el 7 y el 14 de septiembre de 2017 en 13 sitios (Tabla 1) con una red planctónica de 27 mm de tamaño de malla en un perfil vertical.

Tabla 1. Estación de muestreo con coordenadas y profundidad máxima.

Sitio de muestreo	Coordenadas		Fecha	Profundidad máxima (m)
1	N 15°48'12.0"	W 79°50'13.8"	07/IX/17	11
2	N 15°48'12.0"	W 79°50'34.7"	07/IX/17	5
3	N 15°49'27.0"	W 79°51'05.6"	08/IX/17	9
4	N 15°49'21.6"	W 79°50'53.0"	08/IX/17	4
5	N 15°49'54.8"	W 79°52'27.9"	09/IX/17	10
6	N 15°49'03.2"	W 79°52'42.4"	09/IX/17	3
7	N 15°48'02.7"	W 79°51'05.0"	10/IX/17	9
8	N 15°55'57.6"	W 79°49'16.4"	11/IX/17	3
9	N 15°53'02.5"	W 79°47'13.7"	11/IX/17	12
10	N 15°48'32.8"	W 79°50'27.8"	12/IX/17	8
11	N15°48'09.3"	W 79°50'55.5"	12/IX/17	10
12	N15°48'09.4"	W 79°50'25.6"	13/IX/17	7
13	N15°52'25.0"	W 79°46'12.2"	14/IX/17	8

Las muestras de agua se conservaron en botellas de plástico opacas; se añadió una solución de etanol y formol hasta una concentración final equivalente a la solución de Transeau (concentración de agua de mar, etanol y formol 6:3:1 respectivamente). Las muestras de agua se analizaron en laboratorio con el método de Utermöhl (Edler & Elbrächter, 2010): la muestra se homogeneizó, luego se sedimentaron 25 ml durante 24 horas y posteriormente se observaron en un microscopio de luz invertida con fase de

contraste, Advanced Optical XD-202, con una cámara Micrometrics S18.CU. Los aumentos utilizados fueron de 20x y 40x.

Las algas en las muestras se identificaron al nivel taxonómico más bajo posible utilizando literatura específica (Cleve, 1878; Madera, 1968; Balech, 1988; Tomás, 1997; Okolodkov, 2010). La información sobre nomenclatura y clasificación taxonómica se obtuvo de AlgaeBase (Guiry & Guiry, 2024).

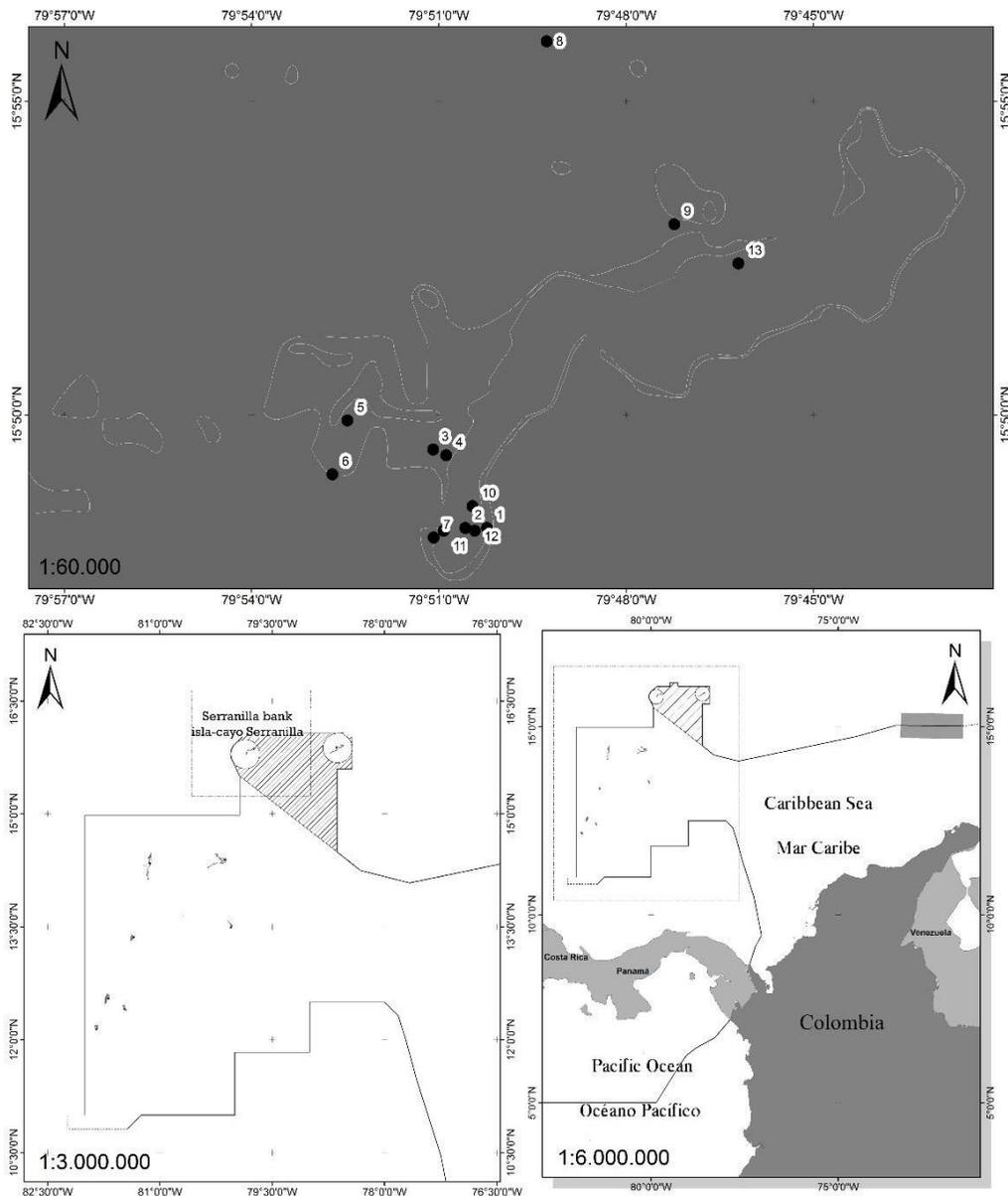


Figura 1. Ubicación de isla Cayos de Serranilla en el mar Caribe y ubicación del sitio de muestreo.

RESULTADOS

Se identificaron veintiocho géneros y veintidós especies de diatomeas, así como ocho géneros y quince especies de dinoflagelados (Tabla 2).

Tabla 2. Listado de especies y estación donde fueron observadas.

Tasa	Sitio de muestra												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bacillariophyceae													
<i>Amphiprora</i> sp.										X			
<i>Amphora</i> sp.								X					
<i>Asterolampra marylandica</i> Ehrenberg 1844						X		X					
<i>Bacillaria paxillifera</i> (O. F. Müller) T. Marsson 1901										X			
<i>Bacteriastrum</i> sp.									X				X
<i>Bleakeleya notata</i> (Grunow) Round 1990		X	X	X	X			X	X		X		
<i>Chaetoceros atlanticus</i> Cleve 1873			X	X								X	X
<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve 1889													X
<i>Chaetoceros pendulus</i> Karsten 1905										X			
<i>Climacosphenia moniligera</i> Ehrenberg 1843										X			
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehr.) Reimann & J.C. Lewin 1964									X		X		X
<i>Eucampia zodiacus</i> f. <i>cylindricornis</i> Syvertsen 1983										X			
<i>Grammatophora serpentina</i> Ehrenberg 1844		X							X				
<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle 1996			X		X								
<i>Hemiaulus hauckii</i> Grunow ex Van Heurck 1882					X			X					
<i>Isthmia enervis</i> Ehrenberg 1838	X						X			X			
<i>Licmophora</i> sp.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Mastogloia rostrata</i> (Wallich) Hustedt 1933 - Brasil									X				
<i>Navicula</i> sp.										X			
<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson ex Kützing) Grunow 1862	X	X	X	X	X	X			X	X	X		
<i>Nitzschia sigma</i> (Kützing) W.Smith 1853		X											
Indeterminate pennate diatoms	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
<i>Pleurosigma</i> sp.		X						X					
<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström 1986	X		X					X	X				
<i>Pseudo-nitzschia complejo delicado</i>			X	X									
<i>Rhabdonema adriaticum</i> Kützing 1844					X								
<i>Rhizosolenia</i> sp.			X			X			X				
<i>Striatella</i> sp.												X	

Tasa	Sitio de muestra												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Striatella unipunctata</i> (Lyngbye) C.Agardh 1832		X		X	X	X		X	X		X	X	X
<i>Synedra</i> sp.		X											
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky 1902	X	X	X	X			X		X				
<i>Thalassiophysa hyalina</i> (Greville) Paddock & P.A.Sims 1981			X	X	X				X	X		X	
<i>Toxarium undulatum</i> Bailey 1854				X	X			X	X		X		
Dinophyceae													
<i>Ceratocorys horrida</i> Stein 1883						X		X					
<i>Acanthodinium caryophyllum</i> Kofoid 1907						X							
Dinoflagelados tecate indeterminados					X			X	X	X			X
<i>Ornithocercus steinii</i> Schütt 1900							X						
<i>Phalacroma rotundatum</i> (Claparéde & Lachmann) Kofoid & J. R. Michener 1911												X	
<i>Podolampas palmipes</i> F. Stein 1883	X			X			X		X	X			X
<i>Podolampas spinifer</i> Okamura 1912					X								
<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg 1834									X				
<i>Protoperidinium cf. pellucidum</i> Bergh 1882				X									
<i>Tripes cf. minutus</i> (Jørgensen) F. Gómez 2013	X												
<i>Tripes gracilis</i> (Pavillard) F. Gómez 2013											X		
<i>Tripes macroceros</i> (Ehrenberg) Hallegraeff & Huisman 2020	X	X	X										
<i>Tripes muelleri</i> Bory 1826	X					X			X				
<i>Tripes pentagonus</i> (Gourret) F. Gómez 2021													X
<i>Tripes setaceus</i> (Jørgensen) F. Gómez 2013						X							
<i>Tripes</i> sp.	X				X	X	X	X	X		X	X	
<i>Tripes teres</i> (Kofoid) F. Gómez 2013	X	X		X		X		X		X	X	X	

En cuanto a las diatomeas, las especies más comunes observadas fueron *Nitzschia longissima*, presentes en nueve de los trece sitios, y *Thalassionema nitzschioides*, encontrada en seis sitios. Las especies menos comunes fueron *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros pendulus* y *Eucampia zodiacus* f. *Cylindricornis*. Además, observamos algunas especies bentónicas: *Striatella unipunctata*, *Grammatophora serpentina*, *Bacillaria paxillifera*, *Climacosphenia moniligera*, *Mastogloia rostrata*, *Nitzschia*

sigma, *Rhabdonema adriaticum*, *Amphora* sp., *Amphiprora* sp., *Licmophora* sp. y *Synedra* sp. En cuanto a los dinoflagelados, las especies más comunes fueron *Tripes teres* (ocho sitios) y *Podolampas palmipes* (seis sitios).

Las diatomeas céntricas son el 24%, las diatomeas pennadas son el 42%, que suman el 66% de las diatomeas totales. Los dinoflagelados, a su vez, representan el 34% de las especies catalogadas.

Entre las especies potencialmente toxicogénicas, encontramos la diatomea *Pseudo-nitzschia delicatissima*, que produce ácido domoico (causante de intoxicación amnésica por mariscos) y *Phalacroma rotundatum* (ácido okadaico y/o dinofisistoxina -2 y/o pectenotoxina-2), aunque existe controversia sobre su naturaleza toxigénica (Zingone y Larsen, 2011).

Once de las veintidós especies de diatomeas encontradas son nuevos registros para Serranilla

(Tabla 2); *Mastogloia rostrata* es un nuevo registro para el país (Fig. 2); y *Grammatophora serpentina* para el mar Caribe (Fig. 2). Trece de las quince especies de dinoflagelados son nuevos registros para Serranilla; *Tripos minutus* y *Podolampas spinifer* son nuevos registros para el país (Fig. 2), mientras que *Phalacroma rotundatum* es un nuevo registro para el Caribe, pero ha sido reportado previamente para el Golfo de México. Además, *Cladopyxis caryophyllum* (Fig. 2) se reporta por primera vez en el mar Caribe.

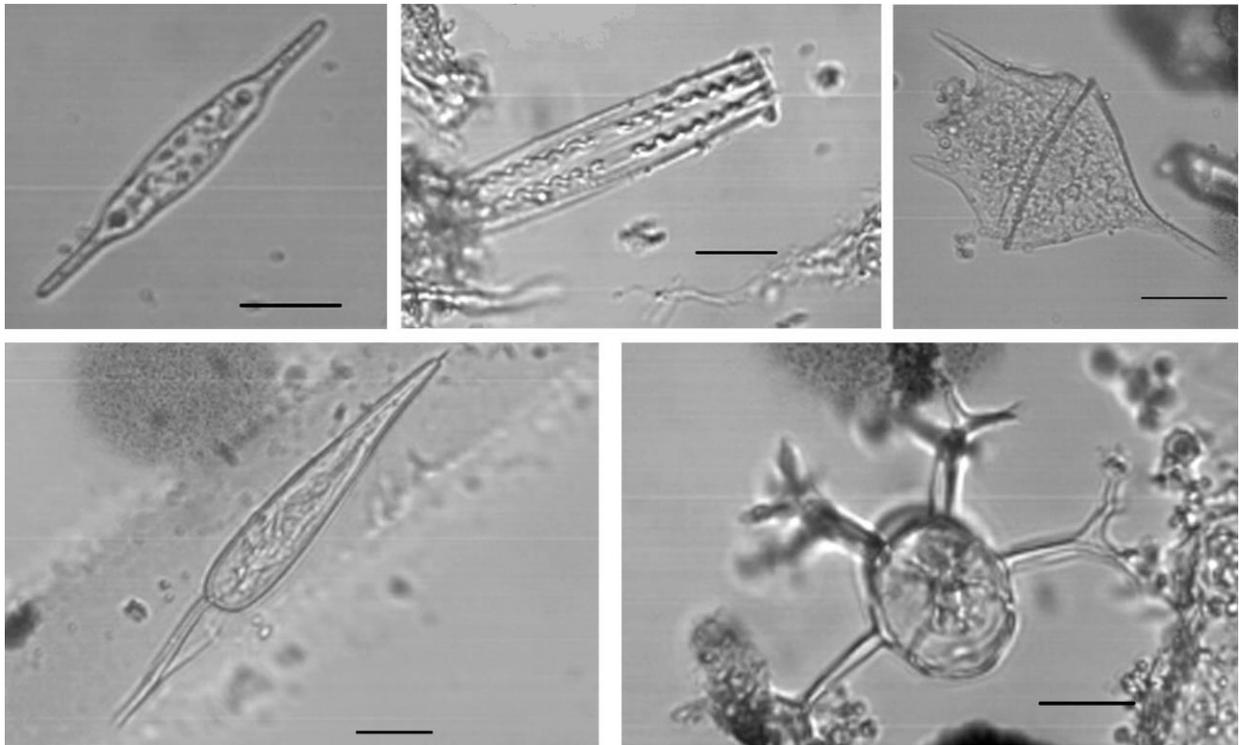


Figura 2. Arriba a la izquierda. *Mastogloia rostrata*. Arriba en el centro. *Grammatophora serpentina*. Arriba a la derecha. *Tripos minutus*. Abajo a la izquierda. *Podolampas spinifer*. Abajo a la derecha. *Cladopyxis caryophyllum*. Barras de escala: 20 μ m.

DISCUSIÓN

En Colombia no hay muchos estudios publicados sobre la diversidad del fitoplancton marino (Vidal y Carbonell, 1977; Carbonell, 1979a; 1979b; 1982; Vidal, 1981; Fernández y García, 1998; De la Hoz Aristizábal, 2004; Ramírez-Barón, Franco-Herrera, García-Hoyos y López, 2010). Lozano-Duque, Vidal y Navas (2010, 2011) publicaron una lista de diatomeas (312 especies) y dinoflagelados (169 especies) para el Caribe colombiano; para el archipiélago, reportan 48 taxones de diatomeas y 49 especies de dinoflagelados.

El presente estudio cuenta con 36 géneros y 37 especies de fitoplancton, todas ellas diatomeas o dinoflagelados. Estos valores son típicos de los mares oligotróficos y se acercan a lo reportado para las islas de Providencia, donde Campos-González (2007) encontró 46 géneros en 39 estaciones. A lo largo de la costa continental de Colombia, cerca de Santa Marta, se observaron entre 47 y 51 géneros de especies fitoplanctónicas, según la estacionalidad (Ramírez-Barón *et al.*, 2010).

En Los Roques, Venezuela, que es un atolón que se encuentra a unos 130 km de la costa principal, Cavada-Blanco, Zubillaga y Bastidas (2016) observaron que el 62% de las especies fitoplanctónicas eran diatomeas, seguidas de dinoflagelados (25,4%) y cianobacterias (8%). En nuestro estudio, no se encontraron cianobacterias, pero el porcentaje de diatomeas fue muy similar al estudio mencionado, al igual que la porción de dinoflagelados. Gutiérrez-Salcedo *et al.* (2015) reportaron 138 especies de fitoplancton para toda el Área de Régimen Conjunto, que abarca los bajos de Serranilla, Alicia y Bajo Nuevo. Para Serranilla, reportaron 121 especies, que es un número mucho mayor de lo encontrado en el presente trabajo y de lo que se ha reportado para el archipiélago por Lozano-Duque *et al.* (2010, 2011). La razón principal de la discrepancia entre el estudio mencionado y el presente es la metodología utilizada: Gutiérrez-Salcedo *et al.* (2015) utilizaron una malla de 20 μm , que bajaron a una profundidad de 50 m y arrastraron horizontalmente durante 10 minutos. Nuestra red tenía un tamaño de malla ligeramente mayor (27 μm), que se bajó verticalmente hasta el fondo (3-12 m de profundidad) y luego se recuperó. No se obtuvo la concentración de la muestra bajando la red verticalmente. Sin embargo, las especies reportadas tanto por Gutiérrez-Salcedo *et al.* (2015) y este estudio son muy pocas, a saber: *Chaetoceros curvisetum*, *Hemiaulus hauckii* y *Thalassionema nitzschioides* para las diatomeas; *Ceratocorys horrida* y *Ornithocercus steinii* para los dinoflagelados. Algunas diatomeas comunes identificadas solo para el género en ambos estudios son las siguientes: *Amphora*, *Bacteriastrum*, *Navicula*, *Pleurosigma* y *Rhizosolenia*. Todas las demás especies identificadas en este estudio incrementan la diversidad de fitoplancton en Serranilla. En las aguas oceánicas, los organismos fitoplanctónicos tienden a reducir su tamaño. En Los Roques, Venezuela, la mayoría de las especies de diatomeas identificadas (62% de todas las diatomeas contadas) eran pequeñas (6-10 y 16-20 μm), así como la mayoría de los dinoflagelados (48% del total tenían un tamaño de 16-20 μm) (Cavada-Blanco *et al.*, 2016). El número más bajo de taxones identificados aquí puede deberse al tamaño de la malla, que no capturó organismos pequeños. Hay evidencia de que la respuesta del fitoplancton al cambio climático incluye un cambio hacia tamaños más

pequeños (Taylor *et al.*, 2012). Por lo tanto, este factor debe tenerse en cuenta para estudios posteriores. Sin embargo, la falta de información oceanográfica en el área de estudio no permite relacionar la comunidad biológica con su entorno, lo que dificulta su comparación con otros estudios.

Gutiérrez-Salcedo *et al.* (2015) observaron una gran abundancia relativa de los géneros *Chaetoceros*, *Bacteriastrum*, *Pseudonitzschia* y *Leptocylindrus*. Con excepción de este último, estos géneros también fueron encontrados en el presente estudio. Los autores sugirieron que la masa de agua alrededor de Serranilla puede presentar condiciones costeras, ya que estos géneros son más típicos de los sistemas costeros. También afirman que podría haber sido traída por la corriente desde el río Magdalena o el Giro Panamá-Colombia (Gutiérrez-Salcedo *et al.*, 2015). Sin embargo, no se ha comprobado que el penacho de agua del río Magdalena alcance los 15 grados de latitud (Cañón-Páez y Santamaría del Ángel, 2003), donde se encuentra Serranilla. Sin embargo, un estudio más reciente mostró una marcada influencia de la descarga de los ríos en la cuenca colombiana al sur de los 12 grados de latitud, y poco o ningún efecto al norte (Beier *et al.*, 2017). Es claro que se necesitan estudios oceanográficos en el área para comprender mejor la composición y dinámica del fitoplancton en Cayo Serranilla.

Se observó una diatomea tóxica en las muestras: *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *productora* de ácido domoico, que puede causar la intoxicación amnésica por mariscos. También se identificó una especie de *Prorocentrum*: *P. micans*. Muchos taxones del género están involucrados en la intoxicación por ciguatera y mariscos parálíticos, y se han observado en otros sitios del archipiélago (Rodríguez, Mancera-Pineda, & Gavio, 2010). De acuerdo con Pottier, Vernoux, & Lewis (2001), la ciguatera es endémica del mar Caribe, siendo Florida su límite norte y Martinica su límite sur. Sin embargo, se han observado brotes de ciguatera más al sur, especialmente en la última década (Celis y Mancera-Pineda, 2015), incluyendo la Isla de San Andrés. A pesar de que la toxicidad de *P. micans* es dudosa, Gutiérrez-Salcedo *et al.* (2015) encontraron otras especies del género en la zona que podrían ser tóxicas. Además, *Prorocentrum gracile* y *P. micans*, observados en la región, han estado involucrados

en fenómenos de mareas rojas en muchas áreas alrededor del mundo (Alvial y García, 1986; Fukuyo, Sako, Matsuoka, Imai, Takamashi y Watanabe, 2003).

Los dinoflagelados no fotosintéticos, como *Phalacroma rotundatum* (encontrado en este estudio), también se han asociado con la intoxicación diarreica por mariscos (Caroppo, Congestri y Bruno, 1999), y se considera que sintetizan el ácido domoico y sus derivados. Sin embargo, nueva evidencia sugiere que *P. rotundatum* no produce toxinas *de novo*, sino que actúa como vector de sus presas tóxicas a los mariscos (González-Gil, Pizarro, Paz, Velo-Suárez y Reguera, 2011). Dado que Cayo Serranilla se utiliza como zona de pesca, tanto legal como ilegalmente (Abril-Howard *et al.*, 2012), se debe llevar a cabo un mayor monitoreo de las especies tóxicas o potencialmente tóxicas para evitar brotes de intoxicación.

Este trabajo está lejos de presentar una lista exhaustiva de especies fitoplanctónicas en Serranilla. Debido a la lejanía de cualquier asentamiento humano, la zona es casi desconocida desde el punto de vista científico. Solo muy recientemente (en los últimos siete años), algunas instituciones colombianas han comenzado a invertir recursos para estudiar esta región de la Reserva de la Biósfera. Se necesitan más estudios para comprender la dinámica que se desarrolla en el atolón más aislado del mar Caribe.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a todas las instituciones involucradas en la organización de la expedición Seaflower 2017: Comisión Colombiana del Océano (CCO), Armada de Colombia, Dimar, Colciencias, CIOH. Agradecemos también el apoyo del personal del *buque del Ejército 20 de Julio* y del R/V Roncador, al Capitán Hurtado y al Capitán Guerra. Queremos agradecer la colaboración de Coralina, especialmente en las personas de Nacor Bolaños-Cubillos y Casimiro Newball, por prestarnos el barco para realizar el muestreo. Julián Prato, Omar Abril y Violeta Posada ayudaron en el campo, por lo que también les expresamos nuestros agradecimientos.

FINANCIACIÓN

Este trabajo hace parte del proyecto de investigación "Valoración de servicios ecosistémicos de los arrecifes de coral en los alrededores de la isla cayo Serranilla, Reserva de Biósfera *Seaflower*, Caribe colombiano", financiado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Caribe. Emanuela Razza fue parcialmente apoyada por la beca World Campus de la Università Politecnica delle Marche.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

ER identificó las algas, tomó las fotografías y escribió el manuscrito. BG recogió las muestras, escribió y revisó el manuscrito. TR ayudó con la identificación y revisó el manuscrito.

REFERENCIAS

- Abril-Howard, A.; Orozco-Toro, C.; Bolaños-Cubillos, N.; Bent-Hooker, H. (2012). First approach to the knowledge of Serranilla, Alice Shoal and New Shoal coral reef complex, Colombia, northern section of the Seaflower Biosphere Reserve, Western Caribbean. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 4, 1-65
- Alvial, A. & Garcia, B. (1986). Dynamics of a red tide caused by *Prorocentrum gracile* Schütt at Iquique, Chile. *Revista de Biología Marina*, 22, 97-123.
- Balech, E. (1988). Los Dinoflagelados del Atlántico sudoccidental. Publicaciones especiales Instituto Español de Oceanografía.
- Beier, E., Bernal, G.; Ruiz-Ochoa, M.; Barton, E. D. (2017). Freshwater exchanges and surface salinity in the Colombian basin, Caribbean Sea. *PLoS ONE*, 12(8), e0182116. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182116> PMID:28777801 PMCID:PMC5544217
- Bolaños-Cubillos, N.; Abril-Howard, A.; Bent-Hooker, H.; Caldas, J. P.; Acero A. (2015). Lista de peces conocidos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Reserva de Biosfera Seaflower, Caribe occidental colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44 (1), 127-162. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemmar.2015.44.1.24>

- Campos-González, E. M. (2007). Fitoplancton de las islas de Providencia y Santa Catalina, Caribe colombiano. Trabajo de grado, Universidad Jorge Tadeo Lozano, 62 pp.
- Cañón-Páez, M. L.; Santamaría del Ángel, E. (2003). Influencia de la pluma del río Magdalena en el Caribe colombiano. *Bol. Cien. CIOH*, 21, 85-90. <https://doi.org/10.26640/22159045.116>
- Carbonell, M. C. (1979a). *Ceratium* Schrank (Peridinales) en la Bahía de Cartagena (10°25' N y 75°30' W). *Bol. Cient. CIOH*, 2, 21-54. <https://doi.org/10.26640/22159045.7>
- Carbonell, M. C. (1979b). Fitoplancton de las islas del Rosario y alrededores, Colombia (mar Caribe). Diatomeas centrales y algunos dinoflagelados. Informe interno, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH Cartagena.
- Carbonell, M. C. (1982). *Ceratium* Schrank (Dinoflagellatae, Peridinales) de las islas del Rosario, Caribe colombiano. *Anales del Instituto de Investigación Marina Punta Betín*, 12, 71-91. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.1982.12.0.496>
- Caroppo, C.; Congestri, R.; Bruno, M. (1999). On the presence of *Phalacrocoma rotundatum* in the southern Adriatic Sea (Italy). *Aquatic Microbial Ecology*, 17, 301-310. <https://doi.org/10.3354/ame017301>
- Cavada-Blanco, F.; Zubillaga, A. L.; Bastidas, C. (2016). Microphytoplankton variations during coral spawning at Los Roques, Southern Caribbean. *Peer J.*, 4, e1747. <https://doi.org/10.7717/peerj.1747>
- Celis, J. S.; Mancera Pineda J. E. (2015). Análisis histórico de la incidencia de ciguatera en las islas del Caribe durante 31 años: 1980 – 2010. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44 (1), 7-32. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.18>
- Cleve, P. T. (1878). Diatoms from the West Indian archipelago. *Bihang till Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar*, 5 (8), 1-22
- Corredor, J. E.; Howarth, R. W.; Twilley, R. R.; Morell, J. M. (1999). Nitrogen cycling and anthropogenic impact in the tropical interamerican seas. *Biogeochemistry*, 46, 163-178. <https://doi.org/10.1023/A:1006116501466> <https://doi.org/10.1007/BF01007578> <https://doi.org/10.1023/A:1006143927873>
- De la Hoz Aristizábal, M. V. (2004). Dinámica del fitoplancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33, 159-179. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2004.33.0.253>
- Díaz, J. M.; Sánchez, J. A.; Zea, S.; Garzón-Ferreira, J. (1996). Morphology and marine habitats of two Southwestern Caribbean atolls: Albuquerque and Courtown. *Atoll Research Bulletin*, 435, 1-33
- Edler, L.; Elbrächter, M. (2010). The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. En: Karlson B., Cusack C., Bresnan E. (Eds) *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis* (pp. 13-20). IOC UNESCO, Manuals and Guides, 55.
- Eidens, C.; Bayraktarov, E.; Pizarro, V.; Wilke, T.; Wild, C. (2012). *Seasonal upwelling stimulates primary production of Colombian Caribbean coral reefs*. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia.
- Fernández, C. E.; García, C. B. (1998). The dinoflagellates of the genera *Ceratium* and *Ornithocercus* collected in the Golfo de Salamanca, Colombian Caribbean Sea. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 22 (85), 539-559. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.22\(85\).1998.2945](https://doi.org/10.18257/raccefyn.22(85).1998.2945)
- Fukuyo, Y.; Sako, Y., Matsuoka, K.; Imai, I.; Takamashi, M.; Watanabe, M. (2003). Biological character of red tide organisms. En: Okaichi T. (Ed.) *Red tides* (pp. 61-178). Terra Scientific Publishing Company.
- González-Gil, S.; Pizarro, G.; Paz, B.; Velo-Suárez, L.; Reguera, B. (2011). Considerations on the toxigenic nature and prey sources of *Phalacrocoma rotundatum*. *Aquatic Microbial Ecology*, 64, 197-203. <https://doi.org/10.3354/ame01523>

- Guiry, M. D.; Guiry, G. M. (2024). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland. Galway, Ireland. <https://www.algaebase.org> (consulted August 2024).
- Gutiérrez-Salcedo, J. M.; Cabarcas-Mier, A.; Suárez-Mozo, N. (2015). First characterization of the planktonic community in the northern sector of the Joint Regime Area Jamaica-Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44, 343-368. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.2.15>
- Heileman, S. (2007). Thematic report for the insular Caribbean sub-region. The CLME Synthesis Workshop. University of the West Indies, Barbados. 53 pp.
- Lozano-Duque, Y.; Vidal, L. A.; Navas, G. R. (2010). Listado de diatomeas (Bacillariophyta) registrados para el Mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 39(1), 83-116. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.1.144>
- Lozano-Duque, Y.; Vidal, L. A.; Navas, G. R. (2011). Lista de especies de dinoglagelados (Dinophyta) registrados en el Mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40(2), 361-380. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2011.40.2.116>
- Margalef, R. (1969). El ecosistema pelágico del mar Caribe. *Memorias de la Sociedad de Ciencias Naturales La Salle*, 29(32). 36 pp.
- Okolodkov, Y. B. (2010). *Ceratium* Schrank (Dinophyceae) of the National Park Sistema Arrecifal Veracruzano, Gulf of Mexico, with a key for identification. *Acta Botanica Mexicana*, 93, 41-101. <https://doi.org/10.21829/abm93.2010.275>
- Pottier, I.; Vernoux, J. P.; Lewis R. J. (2001). Ciguatera Fish Poisoning in the Caribbean Islands and Western Atlantic. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 168, 99-141. DOI: 10.1007/978-1-4613-0143-1_3 PMID:12882228
- Ramírez-Barón, J. S.; Franco-Herrera, A.; García-Hoyos, L. M.; López, D. A. (2010). La comunidad fitoplanctónica durante eventos de surgencia y no surgencia, en la zona costera del Departamento del Magdalena, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 39 (2), 233-263. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.2.150>
- Restrepo, J. D.; Zapata, P.; Díaz, J. M.; Garzón-Ferreira, J.; García, C. B. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50, p.33-49. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.09.002>
- Rodríguez, E. A.; Mancera-Pineda, J. E.; Gavio, B. (2010). Survey of benthic dinoflagellates associated to beds of *Thalassia testudinum* in San Andres Island, *Seaflower* Biosphere Reserve, Caribbean Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 15 (2), 229-246
- Rodríguez, S.; Cróquer, A. (2008). Dynamics of black band disease in a *Diploria strigosa* population subjected to annual upwelling on the northeastern coast of Venezuela. *Coral Reefs*, 27(2), 381-388. DOI 10.1007/s00338-007-0341-8 123
- Sheng, J.; Tang, L. (2003). A numerical study of circulation in the western Caribbean Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 33(10), 2049-2069. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<2049:ANSOCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2049:ANSOCI>2.0.CO;2)
- Spalding, M.; Fox, H. E.; Allen, G. R.; Davidson, N.; Ferdaña, Z. A.; Finlayson, M.; Halpern, B. S.; Jorge, M. A.; Lombana, A.; Lourie, S. A.; Martin, K. D.; McManus, E.; Molnar, J.; Recchia, C. A.; Robertson, J. (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 57(7), 573-583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
- Taylor, G. T.; Muller-Karger, F. E.; Thunell, R. C.; Scranton, M. I.; Astor, Y.; Varela, R.; Troccoli-Ghinaglia, L.; Lorenzoni, L.; Fanning, K. A.; Hameed, S.; Doherty, O. (2012). Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change. *PNAS*, 109(47), 19315-19320. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207514109> PMID:23071299 PMCid:PMC3511065
- Tomas, C. R. (Eds.). (1997). Identifying Marine Phytoplankton. Academic Press, San Diego, CA.

- Vega-Sequeda, J.; Díaz-Sánchez, C. M.; Gómez-Campo, K.; López-Londoño, T.; Díaz-Ruíz, M.; Gómez-López, D. I. (2015). Biodiversidad marina en bajo Nuevo, bajo Alicia y banco Serranilla, Reserva de Biosfera Seaflower. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44(1), 199-244. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.27>
- Vidal, L. A.; Carbonell, M. C. (1977). Diatomeas y dinoflagelados en la Bahía de Cartagena. [Tesis de pregrado]. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Vidal, L. A. (1981). Diatomeas y dinoflagelados en las islas del Rosario (arrecife coralino) y alrededores. *Bol. Cient. CIOH*, 3, 75-133. <https://doi.org/10.26640/22159045.12>
- Wood, E. J. F. (1968). Dinoflagellates of the Caribbean Sea and adjacent areas. University of Miami Press, Miami.
- Zambrano, J. A.; Andrade, C. A. (2011). Changes in the Serranilla Cay coastline between 1944 and 2009– Archipelago of San Andres – Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 29, 90-106.
- Zingone, A.; Larsen, J. (2011). Dinophysiales. En: Moestrup Ø. et al. (Eds.) IOC-UNESCO taxonomic reference list of harmful microalgae.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Estado de la comunidad coralina en tres complejos arrecifales de la Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe colombiano*Condition of the coral community in three reef complexes of the Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.633> Fecha de recepción: 2024-04-11 / Fecha de aceptación: 2024-08-12Martha Catalina Gómez-Cubillos¹, Carlos Andrés Daza-Guerra², Laura Catalina Franco-León³, María Helena Benavides-Marchena⁴, Richard Andrés Duque-Díaz⁵, Sven Zea⁶

CITAR COMO:

Gómez-Cubillos, M. C.; Daza-Guerra, C. A.; Franco-León, L. C.; Benavides-Marchena, M. H.; Duque-Díaz, R. A.; Zea, S. (2024). Estado de la comunidad coralina en tres complejos arrecifales de la Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 43(1), 31-55. <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.633>

RESUMEN

A pesar de las tendencias contemporáneas de pérdida coralina generalizada, se presume, en parte por falta de información, que los arrecifes oceánicos remotos deben estar en mejor estado que los arrecifes continentales, asumiendo que por su lejanía geográfica hay un menor efecto de presiones humanas directas. Este trabajo tuvo como objetivo determinar si la comunidad coralina de tres atolones oceánicos de la Reserva de Biósfera Seaflower (Alburquerque, Bolívar y Bajo Nuevo) en el Caribe Suroccidental, Colombia, están experimentando cambios hacia nuevas configuraciones bentónicas. Para estimar la cobertura bentónica, riqueza coralina y prevalencia de signos asociados con enfermedades se evaluaron transectos con fotocuadrantes. Para estudiar los céspedes algales en interacción con tejido coralino vivo se extrajeron núcleos. Solo en Bolívar se incluyó el estudio de herbívoros mediante censos estacionarios. Se encontraron 48 especies de corales duros en estos complejos arrecifales, pero la cobertura bentónica estuvo dominada por organismos no constructores de arrecifes (59.1-61.7 %), especialmente céspedes algales. Se identificaron nueve signos asociados con siete enfermedades coralinas. En los bordes de interacción coral-césped se identificaron 15 grupos morfofuncionales de céspedes. Se registraron 20 especies herbívoras afines a 5 grupos funcionales, mostrando baja redundancia funcional respecto a arrecifes continentales del Caribe colombiano, y por lo tanto una alta vulnerabilidad ante la pérdida de especies. Estos resultados muestran que el estado actual de los arrecifes estudiados, a pesar de ser lugares remotos, exhiben cambios del dominio de corales hacia macroalgas, especialmente de céspedes.

PALABRAS CLAVE: comunidad coralina; grupos funcionales; céspedes; herbívoros; deterioro coralino; Seaflower

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3384-5969>. Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar. Correo electrónico: macgomezcu@unal.edu.co

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6599-2328>. Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar. Correo electrónico: caadazagu@unal.edu.co

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8051-5535>. Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar. Correo electrónico: lafranco@unal.edu.co

⁴ ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1348-0101>. Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar. Correo electrónico: mbenavidesma@unal.edu.co

⁵ ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3954-6347>. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Correo electrónico: richarda.duqued@utadeo.edu.co

⁶ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5657-4877>. Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar. Correo electrónico: sezeas@unal.edu.co

ABSTRACT

Despite the contemporary trends of generalized coral loss, it is presumed, in part from lack of information, that remote oceanic coral reefs must be in a better condition than continental ones, assuming that from their geographic remoteness direct human pressures have a lower effect. This work was aimed at determining if the coral community of three oceanic atolls of the Seaflower Biosphere Reserve (Albuquerque, Bolívar and Bajo Nuevo) in the southwestern Caribbean, Colombia, have also experienced changes towards new benthic configurations. To estimate benthic cover, coral richness and prevalence of signs associated with diseases, photo quadrat transects were evaluated. To study algal turfs in interaction with live coral tissue, cores were extracted. Only in Bolívar, herbivores were quantified through stationary censuses. Forty-eight coral species were found in these reef complexes, but the benthic cover was dominated by non-reef-building organisms (59.1 - 61.7 %), especially algal turfs. Nine signs associated with seven coral diseases were identified. In the algal turf - coral interactions, 15 groups of turf morpho functional groups were identified. Twenty herbivore species of 5 functional groups were recorded, showing a low functional redundancy in comparison to continental Colombian Caribbean reefs, and thus a high vulnerability to species loss. These results show that the current state of the studied reefs, despite being remote, show changes in dominance from corals to macroalgae, especially turf algae.

KEYWORDS: Coral community; functional groups; algal turfs; herbivores; coral decline; Seaflower

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes coralinos son ecosistemas estratégicos para el bienestar de las sociedades humanas. No obstante, el escenario actual de cambio climático, las altas tasas de degradación documentadas en las últimas décadas, y su incierta capacidad de resiliencia para responder a las perturbaciones derivadas de peligros naturales y antropogénicos, los posicionan como ecosistemas altamente sensibles y de alto riesgo (Jackson, Donovan, Cramer y Lam, 2014; Bindoff *et al.*, 2019).

Con el Sexto Informe sobre el Estado de los Corales en el Mundo se demostró mediante metaanálisis que entre 2009 y 2018 se perdió el ~14 % de la cobertura coralina global (Souter, Serge, Wicquart, Logan, Obura y Staub, 2021). Concretamente en el Caribe, la pérdida de cobertura coralina promedio entre 1983 y 2019 fue cercana al 2.1 % (cálculo posterior a la gran pérdida coralina ocurrida al inicio de los años 80), favoreciendo así la proliferación de macroalgas (> 50 %) (Souter, Planes, Wicquart, Logan, Obura y Staub, 2022), especialmente de algas con crecimiento tipo césped, que son en la actualidad la cobertura dominante en varios arrecifes (Harris, 2015). Este informe señala que estos cambios son producto de la sinergia entre perturbaciones que operan en diferentes escalas, como son los brotes de epizootias tipo banda blanca (1970-1980) y la pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus

siglas en inglés, documentada desde 2014 a la fecha); la mortalidad masiva de especies clave como el erizo herbívoro *Diadema antillarum* (1983-1984 y 2022); la sobrepesca; los eventos extremos como huracanes y blanqueamientos masivos (1998, 2003, 2005, 2006, 2023), y todas aquellas actividades humanas vinculadas con el desarrollo costero no planificado (Souter *et al.*, 2021).

A pesar de estas tendencias de pérdida y deterioro coralino, aún existen vacíos de información actualizada sobre el estado de los arrecifes oceánicos, suponiendo que su lejanía geográfica y dificultad para el asentamiento humano los mantiene exentos del efecto de las presiones humanas directas (Brainard *et al.*, 2005). Por ello, estos arrecifes remotos son laboratorios naturales para investigar los efectos de perturbaciones a escala global y regional sobre las relaciones entre las comunidades coralinas con su entorno (Perry *et al.*, 2015; Williams, Gove, Eynaud, Zgliczynski y Sandin, 2015).

La Reserva de Biósfera (RB) Seaflower (12°-16 ° N y 78°-82° W) alberga el 76.5 % de las áreas coralinas del Caribe colombiano (Díaz *et al.*, 2000). Sin embargo, por su gran extensión (180 000 km²), la mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en las islas de San Andrés y Providencia (Taylor, Howard y Baine, 2011). Por ello, desde 2014, la Comisión Colombiana del Océano (CCO) ha realizado diez expediciones científicas para generar conocimiento alrededor de la RB

Seaflower y demostrar a partir de bases científicas su relevancia para la humanidad (<https://pnec.cco.gov.co/seaflower/>). Dentro de esta plataforma de investigación, el grupo Fauna Marina Colombiana: Biodiversidad y Usos, del Instituto de Estudios en Ciencias del Mar (Cecimar) de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, participó en tres expediciones (Alburquerque: 2018; Bajo Nuevo: 2021, y Bolívar: 2022) con el proyecto 'Interacción coral-céspedes algales y su efecto sobre las comunidades arrecifales de la Reserva de la Biósfera Seaflower', para recolectar información que permita avanzar en la comprensión sobre los mecanismos que impulsan cambios en los arrecifes y sus consecuencias, en un intento por vislumbrar de qué manera las comunidades arrecifales actuales experimentan cambios hacia nuevas configuraciones bentónicas que impulsan la proliferación de organismos no constructores de arrecifes, así como identificar el rol de las interacciones coral-césped en estas trayectorias.

ÁREA DE ESTUDIO

La Reserva de la Biósfera Seaflower, declarada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) en el año 2000, posee altos índices de diversidad y endemismo de especies (Acero y Garzón-Ferreira, 1994), y en 2005 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia la reconoció como área marina protegida (AMP) (Coralina, 2011). Seaflower es el AMP más grande del Caribe y la segunda de América Latina (Guarderas, Hacker y Lubchenco, 2008). Está constituida por siete atolones (Alburquerque, Bolívar o Courtown, Quitasueño, Serrana, Roncador, Serranilla y Bajo Nuevo), dos islas habitadas (San Andrés y Providencia-Santa Catalina) y un bajo (Bajo Alicia) (Córdoba y López, 1997).

En Seaflower los complejos arrecifales son una serie de estructuras aisladas, alineadas en dirección NE a lo largo del flanco sur de la elevación de Nicaragua (Díaz *et al.*, 2000). Son el resultado de la actividad volcánica durante el período geológico del Cenozoico temprano, la subsidencia del basamento entre los períodos del Cenozoico-Cuaternario y la acumulación de caliza arrecifal sobre las cimas someras (Díaz, 2005).

A lo largo del año la migración de la zona de convergencia intertropical (ZCI) determina el

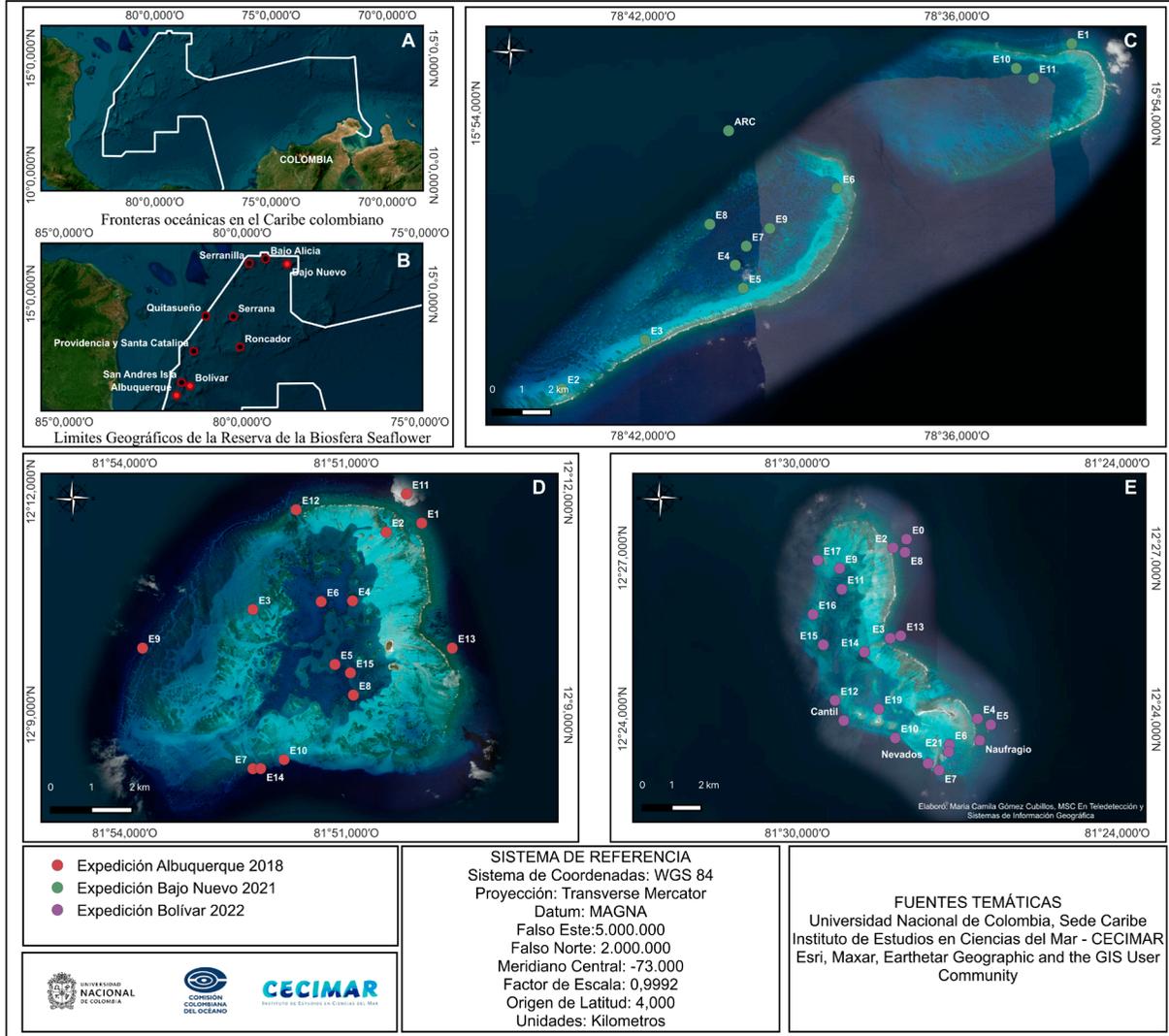
carácter estacional del clima de la región, que es relativamente seco y sigue la estacionalidad típica del Caribe Occidental; con una temporada seca con vientos del NE entre diciembre a marzo; una temporada de transición entre abril y agosto, y una temporada de lluvias de septiembre a noviembre (Guzmán, Ruiz y Cadena, 2014; Lonin, Andrade y Monroy, 2022). Las mareas son mixtas con un fuerte componente diurno, con intervalos entre 0.3 m y 0.6 m (Geister y Díaz, 2007), y las tormentas ocurren, principalmente, durante la segunda mitad del año debido a que Seaflower está dentro del cinturón de huracanes del Caribe (Díaz, Díaz-Pulido, Garzón-Ferreira, Geister, Sánchez y Zea, 1996).

Alburquerque o South West Cay (12°10'N, 81°51'W) es el único atolón con un contorno circular (8 km de E-O, 6 km de N-S y área de 63.8 km²), se sitúa a ~37 km del SE de San Andrés Islas y posee dos cayos densamente vegetados (North Cay y South Cay), separados entre sí por un canal poco profundo (IGAC, 1986; Díaz 2005) (Fig. 1). El atolón de Bolívar o Courtown Cays (12°24'N y 81° 28'W) se localiza a ~30 km al SE de San Andrés Islas, tiene forma de riñón y posee cuatro cayos (La Virgen, Bolívar, Pescadores y Cayo Norte) con forma y tamaño variable en el tiempo (Díaz, 2005) (Fig. 1). Por su parte, Bajo Nuevo o islas Petrel (15°53' N y 78°38'W) se ubica a ~475 km al noreste de San Andrés Islas, es el complejo arrecifal más septentrional de Seaflower y hace parte de la zona de régimen común Colombia-Jamaica (~225 km) (CCO, 2015). Está conformado por dos atolones alargados, con una barrera continua hacia barlovento y truncada a sotavento, y separados entre sí por un canal profundo de ~90 m (Fig. 1).

En general, en estos atolones la dirección y fuerza de los vientos Alisios del NE, y la energía del oleaje que se desplaza a lo largo del Caribe se traducen en similitud geomorfológica y de estructura ecológica, siguiendo un gradiente de barlovento a sotavento (Díaz *et al.*, 2000; Geister y Díaz, 2007). En Alburquerque, Bolívar y Bajo Nuevo, las unidades ecológicas presentan el esquema tradicional de los atolones del Caribe (Díaz *et al.*, 1996), conformados por una terraza prearrecifal y arrecife periférico continuo hacia barlovento, seguido por una terraza lagunar y una cuenca lagunar con parches de arrecifes anastomosados o reticulados, rodeados hacia sotavento por una terraza con parches de

arrecifes poco desarrollados, que finalizan en un talud arrecifal que puede alcanzar profundidades hasta los 1 500 m (Dainco, 1980). En la parte interna de la terraza prearrecifal de sotavento

de algunos atolones hay líneas de arrecifes que alcanzan la superficie por secciones, conformando un arrecife periférico de sotavento incompleto (Díaz *et al.*, 1996).



METODOLOGÍA

Para describir la condición actual de un arrecife e inferir sus posibles trayectorias en el tiempo, la Red Global de Monitoreo de Arrecifes de Coral (GCRMN, por sus siglas en inglés) propone para el Caribe evaluar la cobertura relativa de organismos constructores de arrecifes (corales pétreos y algas coralinas) y sus principales competidores (macroalgas, esponjas y corales blandos), la

salud coralina y la abundancia de taxones clave de peces arrecifales y otros macroinvertebrados (con énfasis en herbívoros) (ICRI, 2016).

Con las expediciones científicas Seaflower se avanzó en la estandarización de metodologías en campo, acordes con la iniciativa GCRMN, y de fácil implementación en arrecifes remotos. Entre expediciones se fueron ajustando los métodos según las capacidades logísticas y ambientales,

permitiendo así el mejoramiento de las técnicas iniciales (2018) y la integración de nuevos componentes metodológicos (2021 y 2022) (Gómez-Cubillos, Daza-Guerra, Márquez y Zea, 2023).

La información en campo se recolectó mediante buceo autónomo (*scuba*) en los complejos arrecifales de Albuquerque (del 25 de septiembre al 2 de octubre de 2018), Bajo Nuevo (del 24 al 30 de noviembre de 2021) y Bolívar (del 22 al 30 de septiembre de 2022). La selección de las estaciones de muestreo en Albuquerque y Bolívar tuvo como referencia las estaciones del proyecto 'Evaluación bioecológica y ambiental de áreas arrecifales del Caribe colombiano 1994-1996' (Díaz *et al.*, 1996), y en Bajo Nuevo las mallas de trabajo de las expediciones 2010 (Abril-Howard, Orozco-Toro, Bolaños-Cubillos y Bent-Hooker, 2012) y 2011 (Vega-Sequeda, Díaz-Sánchez, Gómez-Campo, López-Londoño, Díaz-Ruiz y Gómez-López, 2015).

Cobertura bentónica, riqueza coralina y salud coralina

Por estación, guiados por un flexómetro tendido sobre el fondo, se evaluó un transecto de banda (10 x 2 m), empleando la técnica de fotocuadrantes cada metro, alternándolos a lado y lado del flexómetro. Con cámara digital Canon Powershot G7 con caja estanca adaptada, montada en un marco de tubos de PVC, se tomaron fotografías del sustrato en 10 cuadrantes (0.25 cm²) para un total de 2.5 m² por transecto (Gómez-Cubillos, Gómez-Cubillos, Sanjuan-Muñoz y Zea, 2019) (Fig. 2a).

Las fotografías se procesaron con ImageJ 1.52v. Por cuadrante, a partir de una malla de 100 puntos aleatorios, se calculó la cobertura (%) de las categorías bentónicas descritas por Caricomp (2001) y Garzón-Ferreira, Reyes-Nivia y Rodríguez-Ramírez (2002). Por fotografía se estimó la riqueza coralina y la presencia de signos asociados con enfermedades coralinas (Raymundo, Couch y Harvell, 2008; Weil y Rogers, 2011; Weil *et al.*, 2019; Bruckner, 2020). Estos signos se seleccionaron tomando como referencia: a) cambios de coloración del tejido coralino (oscurecimiento, palidecimiento, blanqueamiento), b) forma de la lesión (regular e irregular) y c) exclusividad con el huésped

(Gómez-Cubillos *et al.*, en prensa). Los signos se asignaron a una o varias enfermedades coralinas reportadas en el Caribe (Gil-Agudelo *et al.*, 2009).

Los datos se procesaron en Microsoft Excel. Por complejo arrecifal se estimó: *i*) la riqueza coralina como el número de especies por estación, *ii*) por transecto (combinando los 10 fotocuadrantes) la cobertura total y relativa (%) a partir de puntos aleatorios, *iii*) la prevalencia de signos (%) por especie coralina ($\# \text{ casos con signo}_i / \# \text{ total colonias sp}_j$) (Weil y Rogers, 2011).

Ensamblajes de céspedes algales en interacción con tejido coralino vivo

Siguiendo las recomendaciones metodológicas de Gómez-Cubillos, Gavio y Zea (2020); Gómez-Cubillos, Daza-Guerra, Márquez y Zea, 2023), por estación se seleccionaron entre 1 y 2 colonias de corales masivos morfológicamente contrastantes, según su tipo de organización colonial (meandroide, plocoide, cerioide), que tuvieran bordes de interacción activo con céspedes algales. Se tomaron fotografías de la colonia y macros de los bordes de interacción de interés. Sobre la interacción seleccionada, conteniendo coral vivo y césped, se extrajo un núcleo de esqueleto coralino empleando martillo y sacabocado de impacto de 27 mm de diámetro (5.7 cm²). Las muestras se fijaron por separado en alcohol al 96 %. (Fig. 2b).

En laboratorio cada núcleo se revisó en húmedo, empleando estereoscopio Zeiss-Discovery-V8 (1.0 - 4.0 X) y escáner Epson Perfection-V850Pro. La estructura de los ensamblajes de algas en interacción con tejido coralino se realizó en términos de composición, cobertura relativa por taxa (%), altura del dosel (mm) y densidad de filamentos (Gómez-Cubillos *et al.*, 2020). Con microscopio óptico Zeiss-AX10, con cámara digital DCM510-CMOS, se tomaron fotografías a escala de los taxa de algas, usando el programa ScopePhoto 3.1. La identificación taxonómica se realizó a nivel de género, empleando claves especializadas y la consulta de expertos.

A partir de la estructura de los ensamblajes y de los géneros identificados se realizaron agrupaciones en categorías empíricas o grupos "morfofuncionales", definidos a partir de afinidades taxonómicas (filo) y sobre las bases

morfológicas de estructura del talo, forma de crecimiento y patrón de ramificación (Balata, Piazzì y Rindi, 2011).

Diversidad y redundancia funcional de herbívoros

Este componente solo se desarrolló durante la expedición Bolívar 2022. Utilizando el método de censo tipo estacionario (Bohnsack y Bannerot, 1986) en tres puntos por estación se registraron peces y macroinvertebrados herbívoros. Este método consiste en la observación de organismos dentro de un cilindro de 7 m de radio (79 m²) por 5 minutos. Con cámara GoPro Hero 9 se registró la riqueza de especies/géneros y abundancia de peces herbívoros pertenecientes a las familias Acanthuridae (cirujanos), Labridae-Scarinae (loros), Ehippidae (catalinas) y Kyphosidae (chopas). Para los macroinvertebrados móviles se buscaron ejemplares de erizos (Echinoidea) y del crustáceo *Maguimithrax* spp., con longitud total mayor a 1 cm (Francis, Filbee-Dexter, Yan

y Côté, 2019; Bortone, Samoilyls y Francour, 2000; Spadaro y Butler, 2021; Williams, 2021) (Fig. 2c).

Los organismos censados se categorizaron en grupos funcionales según su forma de interactuar con el sustrato al consumir algas en: a) buscadores de macroalgas; b) cortadores; c) pastoreadores bioerosionadores, d) pastoreadores raspadores y e) succionadores de sedimentos (Bellwood y Choat, 1990; Bellwood, Hoey y Choat, 2003; Bellwood, Hughes, Folke y Nyström, 2004; Johansson, Van de Leemput, Depczynski, Hoey y Bellwood, 2013; Tebbett, Siqueira y Bellwood, 2022). Se aclara que una misma familia puede tener más de un grupo funcional, como es el caso de Labridae y Acanthuridae. El grado de redundancia funcional se determinó a partir de la riqueza de géneros y especies, y la capacidad de reserva se realizó siguiendo las recomendaciones de Johansson *et al.* (2013).

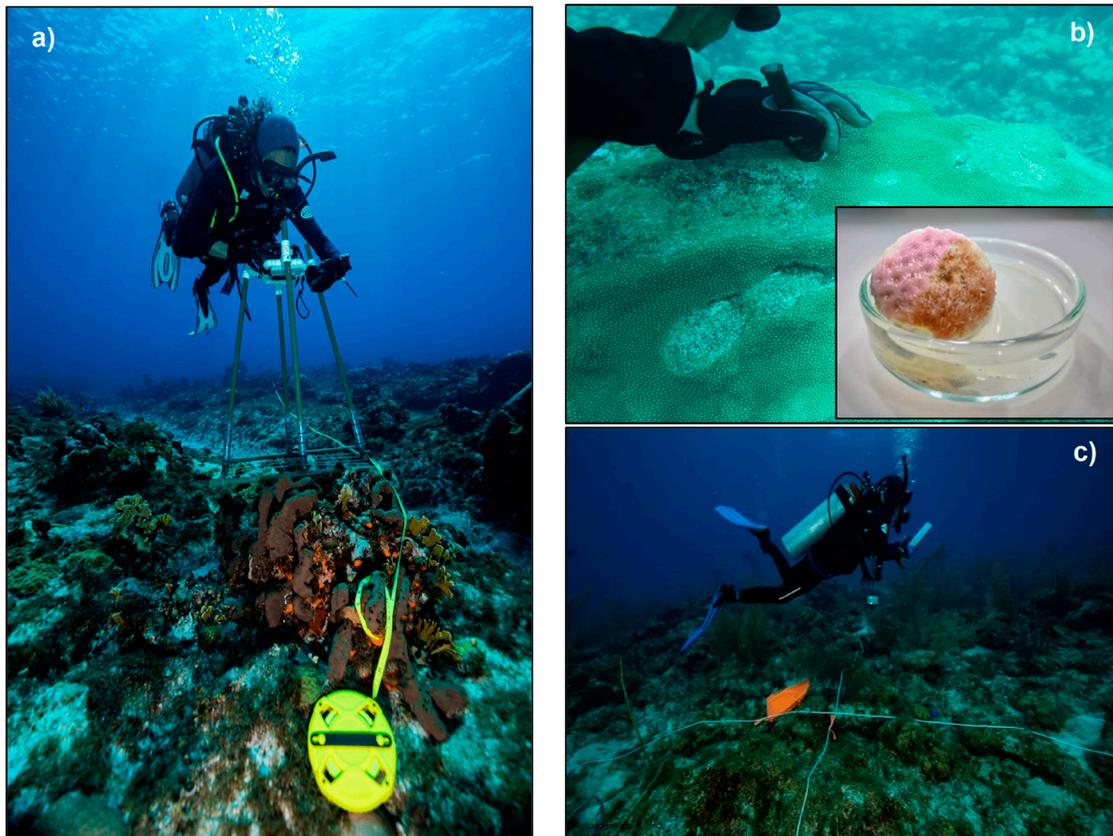


Figura 2. a) Transecto con fotocuadrantes alternos, b) extracción de núcleos con interacciones coral-césped y macro del núcleo extradido; c) censo de peces y macroinvertebrados herbívoros. (Fotos a y c: Santiago Estrada; b: Catalina Gómez-Cubillos y Helena Benavides-Marchena).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tres expediciones se evaluaron 49 estaciones: 15 en Albuquerque, 22 en Bolívar y 12 en Bajo Nuevo (Tabla 1). Del total de estaciones, 17 se ubicaron en la cuenca lagunar, 12 en la terraza de sotavento y talud exterior, 8 en terraza prearrecifal de barlovento, 7 en la terraza lagunar y 5 en el arrecife periférico de barlovento. Con el 53 % de las estaciones se

evaluaron los arrecifes de profundidad media (entre 7 m y 12 m), con el 24 % los arrecifes de mayor profundidad (entre 12 m y 19 m) y con el 22 % restante los arrecifes someros (entre 2 m y 7 m). Del total de estaciones evaluadas, 32 eran ambientes con nula o escasa exposición al oleaje predominante (excluyendo tormentas) y las otras 17 eran ambientes con un nivel de exposición de moderado a alto, según la clasificación propuesta por Zea (2001) (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación y características generales de las estaciones evaluadas en Albuquerque (2018), Bajo Nuevo (2021) y Bolívar (2022).

ID Estación	Coordenadas		Nivel de Profundidad	Nivel de exposición	Unidad geomorfológica
	Latitud	Longitud			
Expedición Albuquerque 2018					
E1	12,193000	-81,83300	Medio	3	TP
E2	12,191000	-81,84100	Somero	2	TL
E3	12,173608	-81,87111	Somero	1	TS
E4	12,175550	-81,84861	Medio	0	Lg
E5	12,161299	-81,85259	Medio	0	Lg
E6	12,175377	-81,85570	Profundo	0	Lg
E7	12,137910	-81,87111	Profundo	2	TS
E8	12,154440	-81,84844	Medio	0	Lg
E9	12,164968	-81,89600	Profundo	1	TS
E10	12,139963	-81,86407	Profundo	0	TS
E11	12,199530	-81,83643	Profundo	3	TP
E12	12,196010	-81,86132	Medio	3	B
E13	12,164968	-81,82613	Medio	3	B
E14	12,137949	-81,86936	Profundo	1	TS
E15	12,15941	81,84909	Somero	3	Lg
Expedición Bajo Nuevo 2021					
E1	15,922056	-78,563389	Medio	2	TP
E2	15,812750	-78,725889	Medio	1	TL
E3	15,828222	-78,699361	Somero	1	TL
E4	15,851917	-78,670611	Medio	0	Lg
E5	15,844583	-78,668083	Somero	1	TL
E6	15,876222	-78,638194	Medio	1	Lg
E7	15,857917	-78,667111	Profundo	0	Lg
ARC	15,894500	-78,672750	Profundo	2	TP
E8	15,864861	-78,678722	Medio	0	Lg

ID Estación	Coordenadas		Nivel de Profundidad	Nivel de exposición	Unidad geomorfológica
	Latitud	Longitud			
E9	15,863583	-78,659611	Medio	0	Lg
E10	15,914250	-78,581111	Medio	0	Lg
E11	15,911111	-78,575583	Medio	0	Lg
Expedición Bolívar 2022					
E0	12,431806	-81,4855	Medio	0	Lg
E2	12,45325	-81,470111	Somero	3	TP
E3	12,425139	-81,470972	Medio	3	B
E4	12,400139	-81,443667	Somero	3	B
E5	12,39825	-81,439556	Profundo	2	TP
E6	12,392028	-81,4525	Somero	1	TL
E7	12,384139	-81,455694	Somero	2	TS
E8	12,451861	-81,466361	Medio	2	TP
E9	12,446861	-81,486806	Medio	0	Lg
E10	12,394139	-81,469389	Medio	0	TS
E11	12,440361	-81,486111	Medio	0	Lg
E12	12,405806	-81,488222	Medio	1	TS
E13	12,425861	-81,467694	Profundo	2	TP
E14	12,420889	-81,479028	Somero	1	TL
E15	12,423083	-81,491917	Profundo	0	Lg
E16	12,432528	-81,495111	Medio	1	TS
E17	12,449361	-81,493583	Medio	1	TS
E19	12,403111	-81,474528	Medio	0	Lg
E21	12,389806	-81,452694	Somero	1	TL
Nevados	12,38625	-81,459139	Medio	0	TS
Nafragio	12,393389	-81,442972	Medio	3	B
Cantil	12,399556	-81,485472	Profundo	0	TS

Abreviaturas: Nivel de profundidad: Somero < 7 m; Medio entre 7 y 12 m; Profundo > 12 m (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002). Nivel de Exposición: 0 (nulo); 1 (escaso); 2 (moderado); 3 (fuerte), respecto al oleaje y la profundidad de la columna de agua (Zea, 2001). Unidad geomorfológica: TP (terrace prearrecifal o de barlovento); B (arrecife periférico de barlovento); TL (terrace lagunar); Lg (laguna con parches coralinos) y TS (terrace de sotavento y talud exterior) (Díaz *et al.*, 1996). Los metadatos se pueden descargar en: Alburquerque (<https://doi.org/10.15472/b3hg97>); Bajo Nuevo (<https://doi.org/10.15472/2ke98s>); Bolívar (<https://doi.org/10.15472/0skaoj>)

Cobertura bentónica

En Alburquerque, Bajo Nuevo y Bolívar, el bentos estuvo dominado por organismos no constructores de arrecifes (macroalgas carnosas, corales blandos y poríferos) (entre 59.1 ± 11.3 y 61.7 ± 10.2 % - promedio \pm D.E., valores calculados a partir de las unidades de muestreo.

Esto es un transecto por estación, por separado para cada atolón; mientras que las especies constructoras (corales escleractíneos, hidrocorales y algas coralinas) oscilaron entre el 23.9 ± 10.4 y el 26.7 ± 15.2 %. Por su parte, el sustrato abiótico representó entre el 11.7 ± 11.6 y el 15 ± 11.1 % del sustrato (Fig. 3).

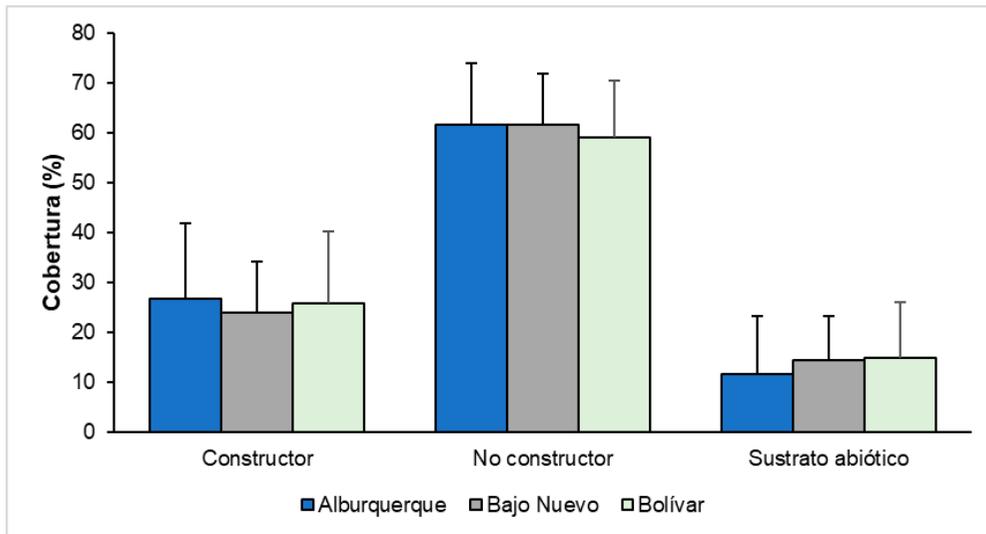


Figura 3. Cobertura (%) general de los principales componentes bentónicos en los complejos arrecifales de Alburquerque, Bolívar y Bajo Nuevo (Promedio $\bar{X} \pm D.E.$).

Al excluir el sustrato abiótico para recalculer la cobertura viva se confirmó que las macroalgas dominaron en los tres complejos arrecifales (entre 69.3 ± 15.8 y 72 ± 10.7 %), particularmente los céspedes algales, con coberturas entre 43.2 ± 7.1 y 44.7 ± 12.7 %. Los corales escleractíneos e hidrocorales (entre 19.8 ± 12.4 y 21.2 ± 12.5 %) estuvieron representados, principalmente, por colonias masivas (entre 14.2 ± 10.9 y 14.7 ± 9.3 %); mientras que los hidrocorales aportaron menos

del 2 %. Los demás organismos bentónicos (corales blandos, esponjas y otros) registraron las coberturas más bajas (entre 8.2 ± 4.2 y 9.5 ± 7 %); pero, en Alburquerque y Bajo Nuevo los gorgonáceos fueron las comunidades más representativas (entre 7.7 ± 6.4 % y 5.3 ± 4.2 %, respectivamente), mientras que en Bolívar el mayor aporte fue de las esponjas (5.4 ± 6.9 %) (Fig. 4).

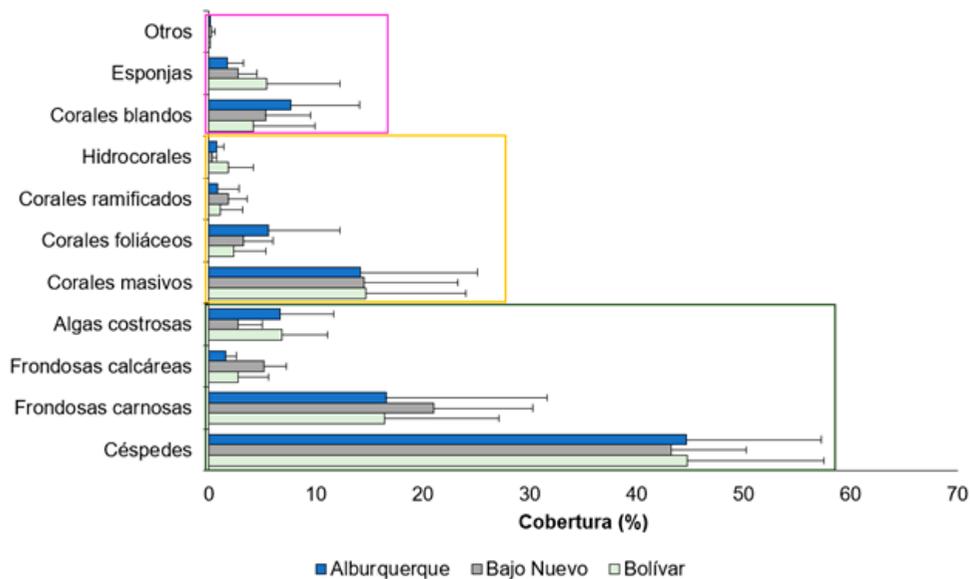


Figura 4. Cobertura % (relativo al total vivo) de organismos constructores de arrecifes (recuadro amarillo) y sus principales competidores macroalgas y otros organismos sésiles (recuadro verde y fucsia, respectivamente) en los complejos arrecifales de Alburquerque, Bolívar y Bajo Nuevo (Promedio $\bar{X} \pm 1 D.E.$, de las estaciones de cada complejo).

El dominio de los céspedes algales sugiere que estos arrecifes están experimentando un cambio del dominio de corales hacia las macroalgas, trayectoria ya descrita para otros arrecifes del Caribe (Souter *et al.*, 2021). Estos cambios hacia la dominancia de las macroalgas son precedidos por una pérdida de resiliencia, producto del aumento en la frecuencia e intensidad de perturbaciones antropogénicas, entre ellas la sobrepesca de herbívoros, dejando al ecosistema vulnerable ante nuevas perturbaciones (Mumby *et al.*, 2006; Nyström, Folke y Moberg, 2000). El dominio de las macroalgas se mantiene debido a mecanismos de retroalimentación; por ejemplo, una perturbación inicial (e.g. brotes de epizootias) genera mortalidad coralina, dejando sustrato disponible para la colonización de las macroalgas (céspedes en este caso); pero estas algas aumentarían su cobertura si la abundancia de herbívoros es baja o si proliferan a una velocidad suficiente para superar la capacidad de pastoreo de los herbívoros (Williams, Polunin y Hendrick, 2001). En suma, estos bucles afectan el reclutamiento coralino, reducen la tasa de crecimiento de los corales y puede generar mortalidad adicional en las colonias (Tanner, 1995; Kuffner, Walters, Becerro, Paul, Ritson-Williams y Beach, 2006; Smith *et al.*, 2006; Box y Mumby, 2007; Norström, Nyström, Lokrantz y Folke, 2009).

Diversidad de especies coralinas

En los tres atolones se confirmó la presencia de 48 especies de corales duros, 45 de escleractíneos y 3 de hidrocorales (Tabla 2). La mayor riqueza se encontró en Bolívar (43 spp.), seguida por Albuquerque (34 spp.) y Bajo Nuevo (32 spp.).

La variación en la riqueza de especies coralinas entre complejos arrecifales refleja una compleja interacción entre factores bióticos y abióticos (Guzmán y Cortés, 1993). Una mayor diversidad puede ser respuesta a condiciones ambientales

más propicias, como por ejemplo alta disponibilidad de sustratos adecuados para el asentamiento coralino y una mejor calidad de las aguas (López-Londoño *et al.*, 2023). Además, las características geomorfológicas particulares de cada complejo pueden propiciar una amplia variedad de microhábitats que fomentan la diversificación de especies (Díaz *et al.*, 1996). Por el contrario, la sobrepesca, especialmente de herbívoros, puede limitar la capacidad del sistema para mantener la riqueza coralina (Roberts, 1995), que junto con los brotes de epizootias puede alterar la estructura de las comunidades (Márquez y Díaz, 2005). También se debe reconocer el efecto de las tormentas tropicales y huracanes, que modelan la diversidad de manera diferencial entre atolones, según la intensidad y cercanía del evento. Por ejemplo, en 1988 la trayectoria del huracán Joan estuvo a unos ~50 km de los cayos del sur (Vega-Sequeda *et al.*, 2015), y en 2020 los huracanes Iota y Eta afectaron con mayor fuerza la zona norte de la RB Seaflower.

De las 48 especies coralinas observadas, dos son nuevos registros para la RB Seaflower (*Colpophyllia breviserialis* y *Porites colonensis*) y para 13 especies se amplía su ámbito de distribución en los cayos del norte y del sur (*Agaricia fragilis*, *A. grahamae*, *A. humilis*, *A. tenuifolia*, *Cladocora arbuscula*, *Dendrogyra cylindrus*, *Isophyllia sinuosa*, *Madracis formosa*, *Meandrina jacksoni*, *Mycetophyllia danaana*, *Porites divaricata*, *Siderastrea radians* y *Solenastrea bournoni*) (Tabla 2). Estos hallazgos sugieren que la posición de estos complejos arrecifales, en términos de circulación oceánica, promueve la conectividad entre poblaciones, ampliando los rangos de distribución y diversidad de las especies (Lopera-García, 2020). No obstante, es importante reconocer que los métodos de muestreo y tecnologías empleadas durante las expediciones Seaflower permitieron recolectar los datos sistemáticamente y, por tanto, estimar con mayor precisión la riqueza coralina.

Tabla 2. Especies de corales duros registradas en las expediciones científicas Albuquerque (2018), Bajo Nuevo (2021) y Bolívar (2022).

Especies	Categoría y criterios IUCN	Complejo arrecifal		
		Albuquerque	Bajo Nuevo	Bolívar
<i>Acropora cervicornis</i>	CR ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Acropora palmata</i>	CR ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Agaricia agaricites</i>	VU ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Agaricia fragilis</i>	LC ¿?	X ⁱ	X	X ⁱ
<i>Agaricia grahamae</i>	NT ↓ (A2bce)	X ⁱ	X ⁱ	
<i>Agaricia humilis</i>	CR ↓ (A3c)	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ

Especies	Categoría y criterios IUCN	Complejo arrecifal		
		Alburquerque	Bajo Nuevo	Bolívar
<i>Agaricia lamarcki</i>	CR ↓ (A3c)			X
<i>Agaricia tenuifolia</i>	CR ↓ (A3c)		X	X ¹
<i>Agaricia undata</i>	LC ¿?			X
<i>Cladocora arbuscula</i>	LC ¿?		X ¹	
<i>Colpophyllia natans</i>	VU ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Colpophyllia breviserialis</i>	CR ↓ (A3c)		X ¹	
<i>Dendrogyra cylindrus</i>	CR ↓ (A2bce)	X		X ¹
<i>Dichocoenia stokesii</i>	VU ↓ (A3c)	X		X
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Eusmilia fastigiata</i>	CR ↓ (A3c)	X		X
<i>Favia fragum</i>	LC ¿?	X	X	X
<i>Helioseris cucullata</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Isophyllia sinuosa</i>	LC ¿?			X ¹
<i>Isophyllia rigida</i>	LC ¿?	X	X	X
<i>Madracis decactis</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Madracis formosa</i>	NT ↓ (A2bce)	X ¹		X ¹
<i>Manicina areolata</i>	LC ¿?	X	X	
<i>Meandrina jacksoni</i>	CR ↓ (A3c)			X ¹
<i>Meandrina meandrites</i>	CR ↓ (A3c)	X		X
<i>Millepora alcicornis</i>	VU ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Millepora complanata</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Montastraea cavernosa</i>	LC ¿?	X	X	X
<i>Mussa angulosa</i>	NT ↓ (A2bce)			X
<i>Mycetophyllia aliciae</i>	LC ¿?		X	
<i>Mycetophyllia danaana</i>	CR ↓ (A3c)		X ¹	X ¹
<i>Mycetophyllia ferox</i>	CR ↓ (A3c)			X
<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	LC ¿?	X		X
<i>Orbicella annularis</i>	EN ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Orbicella faveolata</i>	EN ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Orbicella franksi</i>	NT ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Porites astreoides</i>	LC ¿?	X	X	X
<i>Porites colonensis</i>	VU ↓ (B2ab iii)	X ¹		X ¹
<i>Porites divaricata</i>	LC ¿?	X	X	X ¹
<i>Porites porites</i>	LC ¿?	X	X	X
<i>Pseudodiploria clivosa</i>	NT ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Scolymia spp.</i>	CR ↓ (A3c)			X
<i>Siderastrea radians</i>	LC ¿?	X	X	X ¹
<i>Siderastrea siderea</i>	CR ↓ (A3c)	X	X	X
<i>Solenastrea bournoni</i>	LC →			X ¹
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	NT ↓ (A2bce)	X	X	X
<i>Stylaster roseus</i>	Sin evaluar			X

Abreviaturas: X (presencia); X¹ (registro nuevo para el complejo arrecifal). Categorías IUCN: en peligro crítico (CR), en peligro (EN), vulnerable (VU), casi amenazada (NT); preocupación menor (LC), tendencia poblacional decreciente (↓), desconocida (¿?), estable (→).

Salud coralina

En los tres complejos arrecifales se identificaron nueve signos asociados con siete enfermedades coralinas [White Band Disease (WBD); White Plague Disease (WPD); Yellow Band Disease (YBD); Dark Spots Disease (DSD); Black Band Disease (BBD); Aspergilliosis (ASP) y blanqueamiento] (Gil-Agudelo *et al.*, 2009). Además, cuatro de estos signos se asocian con Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD). Del total de colonias evaluadas (17 379), los signos encontrados afectaron 4 géneros, 14 especies y al 11.4 % de las colonias. La mayor prevalencia de signos se registró en Bajo Nuevo (23.5 %), seguido por Alburquerque (3.3 %) y Bolívar (1.8 %). El signo asociado con BBD solo se registró en los cayos del sur, mientras que las colonias afectadas por signos asociados con SCTLD representaron el 63 % en Bolívar y el 84.9 % en Bajo Nuevo.

Las enfermedades han sido una fuente importante de mortalidad de corales en las últimas décadas en los arrecifes colombianos (Garzón-Ferreira, Gil-Agudelo, Barrios y Zea, 2001). Con los resultados de las expediciones se confirma que el deterioro coralino vinculado con epizootias mixtas es diferencial entre complejos arrecifales, y que los arrecifes de Bajo Nuevo son los más deteriorados, a pesar de que en los años 1990 se catalogaron como los mejor conservados del Caribe colombiano (Bruckner, 2012).

Ensamblajes de céspedes algales en interacción con tejido coralino vivo

En los bordes de interacción entre tejido de coral vivo con céspedes se identificaron 15 grupos morfofuncionales, 14 de ellos presentes

en las muestras recolectadas en Alburquerque, 10 en Bajo Nuevo y 9 en Bolívar (Tabla 3). Estos ensamblajes estuvieron conformados por 50 morfotipos, pertenecientes a 33 géneros, 12 órdenes y 23 familias. Los ensamblajes con morfologías basadas en filamentos delgados no calcáreos, con talos erectos y/o postrados fueron los más recurrentes en los bordes de interacción evaluados. Por el contrario, los céspedes con formas vesiculares y talos calcáreos fueron exclusivos de Alburquerque.

En Bolívar y Bajo Nuevo los ensamblajes estuvieron dominados por grupos de algas uniseriadas y pluriseriadas postradas, corticadas de menor tamaño y laminares con talos bifurcados, que en conjunto conforman esteras cortas, densas y de talos enredados. En contraste, en Alburquerque los ensamblajes eran, en su mayoría, de algas corticadas de menor y mayor tamaño, y de grupos funcionales no filamentosos complejos, como algas costrosas no calcáreas, foliares y vesiculares. Estas diferencias pueden ser respuesta a la combinación de factores ambientales locales como la disponibilidad de nutrientes, luz, pastoreo, entre otros (López, Rodríguez y Silva, 2004). No obstante, la presencia de algas menos complejas morfológicamente también sugiere procesos primarios de colonización del nuevo sustrato disponible, asumiendo que la perturbación vinculada con la pérdida de tejido y exposición del esqueleto coralino, posiblemente epizootias, estaba operando recientemente, como se observó en los arrecifes de Bajo Nuevo (Gómez-Cubillos *et al.*, en prensa). Estos hallazgos permiten sugerir que la complejidad estructural de los céspedes que interactúan con tejido coralino vivo aporta pistas sobre la cronología de la perturbación.

Tabla 3. Propuesta de grupos morfofuncionales de céspedes algales que interactúan con tejido coralino vivo remanente en arrecifes de la RB Seaflower.

Forma de crecimiento	Grupo morfofuncional	Descripción	Género	Filo	Complejo arrecifal		
					Alburquerque	Bajo Nuevo	Bolívar
Filamentoso	Cianobacteria	Filamentos generalmente epífitos, con talo menor a 1 mm, entrelazados o adheridos al huésped. Organizados en conglomerados a manera de ramilletes.	<i>Lyngbya</i> spp. <i>Oscillatoriaceae</i> <i>Spirocoleus</i> spp.	Cyanobacteriota	X	X	X
Filamentoso	Uniseriado postrado	Filamentos no corticados, uniseriados, ramificados o no. Con o sin rizoides. Sin estolones. Filamentos no corticados, uniseriados, ramificados. Talo postrado, sin rizoides, con o sin estolones gruesos.	<i>Cladophora</i> spp. <i>Chaetomorpha</i> spp. <i>Ectocarpus</i> spp. <i>Hincksia</i> spp.	Chlorophyta	X	X	X
Filamentoso	Uniseriados y pluriseriados erecto	Filamentos no corticados, delgados (hasta 2 µm de ancho), con una o varias series de células. Talo erecto con o sin estolones, con o sin rizoides.	<i>Aglaothamnion</i> spp. <i>Bostrychia</i> spp. <i>Ceramium</i> spp. <i>Centroceras</i> spp. <i>Heterosiphonia</i> spp.	Rhodophyta	X	X	X
Filamentoso	Pluriseriados de menor tamaño	Filamentos no corticados pluriseriados, con tamaño menor a 2 µm de ancho. Sin ramificaciones y estolones con rizoides.	<i>Sphacelaria</i> spp.	Ochrophyta	X		
Filamentoso	Pluriseriados postrados	Filamentos finos (hasta 2 mm de ancho) no corticados, con extenso sistema postrado del que surgen ejes erectos ramificados o no. Con o sin rizoides o estolones.	<i>Herposiphonia</i> spp. <i>Polisiphonia</i> spp.	Rhodophyta	X	X	X
Filamentoso	Corticado de talo hueco	Talos erectos, formados por tubos huecos de pocas capas, ramificados o no, con o sin rizoides o estolones.	<i>Champia</i> spp. <i>Griffithsia</i> spp.	Rhodophyta	X	X	
Filamentoso	Corticado de menor tamaño	Filamentos erectos, corticados, ramificados, con ejes delgados (hasta 2 µm de ancho). Sin estolones, ni rizoides.	<i>Chondria</i> spp. <i>Dasya</i> spp.	Rhodophyta	X	X	X

Forma de crecimiento	Grupo morfofuncional	Descripción	Género	Filo	Complejo arrecifal		
					Alburquerque	Bajo Nuevo	Bolívar
Filamentoso	Corticado de mayor tamaño	Filamentos erectos, corticados, ramificados, con ejes gruesos (más de 2 µm de ancho) y polisifónicas. Con una o varias células apicales. Con rizoides, sin estolones.	<i>Gelidiella</i> spp. <i>Gelidium</i> spp. <i>Gelidiopsis</i> spp. <i>Hypnea</i> spp. <i>Pterocladia</i> spp.	Rhodophyta	X	X	X
Vesicular	Sifónico con talo vesicular	Vesículas unicelulares con forma redondeada o alargada.	<i>Valonia</i> spp.	Chlorophyta	X		
Vesicular	Sifónico con talo hueco vesicular	Talo hueco, erecto, Uniseriado, sin ramificaciones o estolones. Vesículas redondeadas.	<i>Enteromorpha</i> spp.	Chlorophyta	X		
Costroso	Costrosas no calcáreas	Talos corticados aplanados adheridos al sustrato, pero no estrictamente adherente. Con o sin ramificaciones. Sin estolones ni rizoides.	<i>Peyssonnelia</i> spp.	Rhodophyta	X		
Foliar	Foliáceas con filamentos cenocíticos	Talos corticados, con crecimiento variable, formando láminas de una a pocas capas de células gruesas policotómicas de filamentos cenocíticos entrelazados. Con rizoides.	<i>Anadyomene</i> spp.	Chlorophyta	X		
Foliar	Laminares con talo bifurcado	Talo laminar, aplanado, con bifurcaciones dicotómicas, ramificadas con ápices redondeados y bilobulados. Con rizoides.	<i>Dictyota</i> spp.	Ochrophyta	X	X	X
Foliar	Laminares corticadas	Talo laminar plano, erecto, con zona cortical con 2 a 3 hileras de células.	<i>Cryptonemia</i> spp.	Rhodophyta		X	
Articular	Coralinos articulados de menor tamaño	Paredes celulares impregnadas de CaCO ₃ , ramificaciones dicotómicas con regiones articuladas y conexiones entre filamentos adyacentes.	<i>Amphiroa</i> spp.	Rhodophyta	X	X	X

Riqueza y abundancia de herbívoros

En Bolívar se registraron 20 especies herbívoras con una abundancia total de 3 171 individuos. Esta diversidad estuvo representada por 14 especies de peces pertenecientes a 3 familias (Acanthuridae = 3 spp.; Labridae = 9 spp. y Kyphosidae = 2 spp.), 4 especies de erizos (*Diadema antillarum*, *Echinometra lucunter*, *Echinometra viridis*, *Eucidaris tribuloides*) y 2 especies de crustáceos (*Percnon gibbesi* y *Maguimithrax spinosissimus*) (Tabla 4).

La riqueza promedio fue de 15.8 ± 2.8 especies, siendo la terraza lagunar (19 spp.) y la prearrecifal (18 spp.) los ambientes más diversos. La abundancia promedio total más alta se registró en la laguna y en la terraza lagunar (85.05 ± 78.3 y 40.3 ± 88.6 individuos, respectivamente). La familia más representativa en número de especies fue Labridae (loros y doncellas) con 9 especies y

con mayor abundancia en la laguna y la terraza de sotavento. En los demás ambientes la familia más abundante fue Acanthuridae (cirujanos), con 1 367 individuos. Las abundancias para esta familia en orden descendente fueron el cirujano azul *Acanthurus coeruleus* (832 individuos), el cirujano pardo *Acanthurus tractus* (471) y el loro listado *Scarus iseri* (380) (Figura 5). En general, diversos estudios del Caribe confirman que los Acanthuridae y Labridae son las familias más abundantes en los ensamblajes ícticos arrecifales. Esto se debe a que los cirujanos son muy abundantes dada su alta biomasa, dieta herbívora, disponibilidad de alimento y capacidad para formar agregaciones de cardúmenes masivos para su alimentación (Bellwood *et al.*, 2003). Por su parte, los peces loro se han descrito como especies generalistas de hábitat, capaces de persistir en un amplio intervalo de condiciones ambientales y conspicuos en ambientes arrecifales (Cheal, Emslie, Miller y Sweatman, 2012).

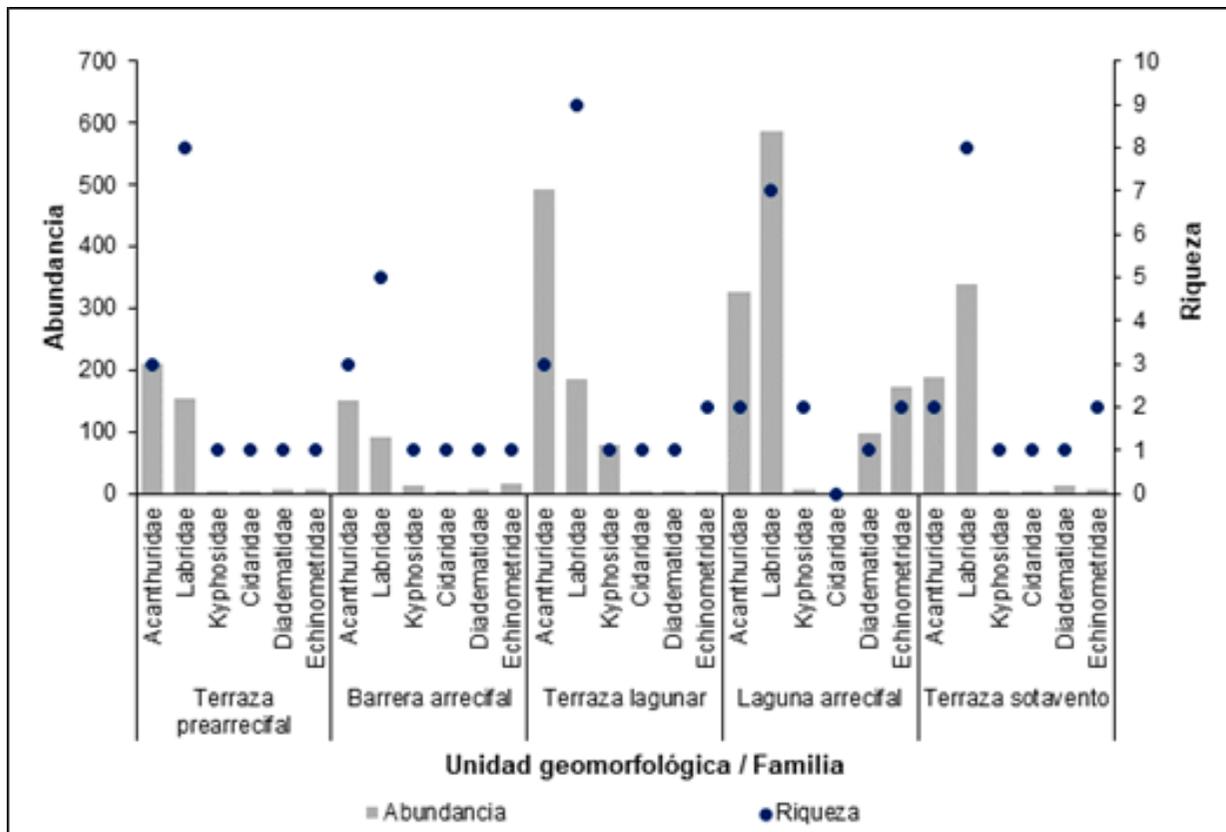


Figura 5. Abundancia y riqueza de las familias de especies herbívoras en el atolón de Bolívar.

Estos resultados se asemejan con otros estudios en Seaflower. Las 14 especies de peces herbívoros reportadas en 2022 fue ligeramente inferior a los registros en los cayos del sur (17 spp.), San Andrés Islas (19 spp.) y Providencia (18 spp.), en donde se reportó la presencia de *Scarus guacamaia*, *Scarus coeruleus*, *Sparisoma radians*, *Kyphosus sectatrix*, *Kyphosus cinerascens* y *Cryptotomus roseus* (Bolaños-Cubillos, Abril-Howard, Hooker, Caldas y Acero, 2015); pero fue mayor a la encontrada en los cayos del norte (Bajo Alicia: 6 spp., Serranilla:

11 spp., Bajo Nuevo: 13 spp.) (Vega-Sequeda *et al.*, 2015). Al comparar entre expediciones en las que otros investigadores realizaron censos de peces en los otros atolones, en Alburquerque se registraron 15 especies de peces herbívoros, incluyendo *S. coeruleus* y *S. radians* (Rivas, Acero, Tavera, Abril-Howard y Bolaños-Cubillos, 2020), mientras que Bajo Nuevo se encontró que en 100 m² de los 20 taxa de peces más abundantes 6 eran herbívoras (Santos-Martínez, Gavio, Prato, Dorado y Macaris, 2023) (Tabla 4).

Tabla 4. Especies de peces e invertebrados herbívoros registrados en las expediciones científicas de Alburquerque 2018; Bajo Nuevo 2021 y Bolívar 2022.

Especie	Complejo arrecifal		
	Alburquerque	Bajo Nuevo	Cayo Bolívar
<i>Acanthurus chirurgus</i>	X	X	64
<i>Acanthurus coeruleus</i>	X	38	832
<i>Acanthurus tractus</i>	X	8	471
<i>Diadema antillarum</i>			128
<i>Echinometra lucunter</i>		51*	88
<i>Echinometra viridis</i>		4*	117
<i>Eucidaris tribuloides</i>			9
<i>Kyphosus</i> spp.			97
<i>Kyphosus vaigiensis</i>	X		5
<i>Maguimithrax spinosissimus</i>			2
<i>Percnon gibbesi</i>			4
<i>Scarus coelestinus</i>	X		3
<i>Scarus coeruleus</i>	X		
<i>Scarus iseri</i>	X	11	380
<i>Scarus taeniopterus</i>	X	4	247
<i>Scarus vetula</i>	X		91
<i>Sparisoma atomarium</i>	X	X	25
<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	X	7	226
<i>Sparisoma chrysopterum</i>	X		27
<i>Sparisoma radians</i>	X		
<i>Sparisoma rubripinne</i>	X	X	130
<i>Sparisoma viride</i>	X	4	225

Nota: Alburquerque: presencia (X) reportada por Rivas *et al.* (2020). Bajo Nuevo: Presencia y densidad de individuos en 100 m² reportada por Santos-Martínez *et al.* (2023). Bolívar: abundancia total (# individuos censados). * Datos de abundancia total tomados por los autores en 2021.

Con relación a los erizos, a pesar de que se han registrado 31 especies de equinoideos en la RB Seaflower, las 4 especies encontradas en 2022 son las mismas reportadas como aquellas especies de aguas someras más comunes, abundantes y que están oficialmente registradas para San Andrés Islas, Bolívar, Providencia, Bajo Nuevo y Serranilla (Borrero-Pérez *et al.*, 2019). Únicamente en Bajo Alicia se reportó una escasa abundancia de *D. antillarum* (Vega-Sequeda *et al.*, 2015) y en la zona de régimen común con Jamaica se reportó exclusivamente *E. tribuloides* y *D. antillarum* (Borrero-Pérez *et al.*, 2019).

Considerando la preferencia de hábitat por especie se confirmó que ciertas familias y especies registraron mayores abundancias en algunas unidades geomorfológicas con respecto a otras (Tabla 5). En general, los factores que parece influir en mayor proporción sobre la abundancia de herbívoros son el grado de exposición al oleaje, la profundidad de la columna de agua y las características del sustrato (Alevizon, Richardson, Pitts y Serviss, 1985; McGehee, 1994). Al comparar los resultados de 2022 con el estudio de Mejía y Garzón-Ferreira (2000) es posible afirmar que *S. iseri*, *S. taeniopterus*, *S. aurofrenatum*, *A. coeruleus*, *A. tractus* y los juveniles de *Sparisoma* spp. y *Scarus* spp. son especies características de la cuenca lagunar y de las terrazas de barlovento y sotavento, ambientes en donde la profundidad de la columna de agua reduce la exposición al oleaje; mientras que, *Kyphosus* spp., *Acanthurus* spp. y *Scarus* spp., prefieren los ambientes someros en donde una alta irradiancia lumínica favorece la proliferación de macroalgas.

Redundancia funcional de herbívoros

La redundancia funcional es la capacidad potencial de que una especie reemplace la función ecológica de otra en caso de desaparecer, y se mide a partir de la riqueza de géneros y especies dentro de un mismo grupo funcional (Johansson *et al.*, 2013). Según esta definición, en Bolívar los grupos funcionales buscadores de macroalgas (4 géneros y 5 especies) y pastoreadores bioerosionadores (5 géneros y 6 especies) tuvieron la mayor capacidad de redundancia funcional. Por el contrario, los grupos de cortadores, pastoreadores raspadores y succionadores de sedimentos, registraron cada

uno un género y de 1 a 3 especies (Tabla 5). En general, todos los grupos registraron las mayores abundancias en la laguna arrecifal, excepto los succionadores de sedimentos que fueron más abundantes en la terraza lagunar y prearrecifal de barlovento.

En el contexto de los peces cirujano, la totalidad de géneros y especies a nivel global, se categorizan seis grupos funcionales (buscadores de macroalgas, cortadores, succionadores de sedimentos, peinadores, cortadores ocultos y alimentadores de la columna de agua) (Tebbet *et al.*, 2022). Según esto, los registros de 2022 corresponden únicamente al 33.3 % del total de grupos funcionales para esta familia. El reducido número de géneros, especies y por ende de grupos funcionales en el Caribe es consecuencia de diversos factores, incluyendo el origen biogeográfico de la diversidad de peces, y representa una de las razones por las que estos ambientes han sido menos resilientes a los cambios del dominio coralino al dominio de las macroalgas (Roff y Mumby, 2012; Burkepile, Rasher, Adam, Hoey y Hay, 2018).

Los buscadores de algas fue el grupo más diverso y con mayor redundancia funcional en Bolívar (peces: 2 géneros y 6 especies; invertebrados: 2 géneros y 2 especies). En el Indo-Pacífico este grupo se compone de 21 especies de 5 géneros, de las que solo el género *Calotomus* (5 especies) y *Leptoscarus vaigiensis* son loros. En el Atlántico este grupo funcional corresponde casi que exclusivamente al género *Sparisoma* y contiene a los consumidores de macroalgas más dominantes en los arrecifes y pastos marinos (Burkepile y Hay, 2010; Adam, Burkepile, Ruttenberg y Paddock, 2015).

Para los pastoreadores bioerosionadores se incluyen 2 géneros de peces loro y 3 de equinodermos. En términos de peces, estas especies son un registro bajo respecto a lo reportado para el Indo-Pacífico (5 especies) (Cheal *et al.*, 2012). Esto se debe a que los grandes peces loro se han reducido en el Caribe debido a la pronunciada pesca de herbívoros, mermando las poblaciones que cumplen esta función (Burkepile *et al.*, 2018; Rivas *et al.*, 2020). Una limitada redundancia funcional en este grupo indica que estos ambientes son altamente vulnerables con la pérdida de alguna de estas especies y que,

en consecuencia, es probable que las tasas de bioerosión disminuyan. Para los pastoreadores raspadores se registraron 3 especies del género *Scarus*. Esta riqueza es baja en comparación con el Indo-Pacífico (17 especies y 2 géneros). Además, otras especies grandes de raspadores como *S. coeruleus* no se observaron en Bolívar, a pesar de estar reportadas para Seaflower (Bolaños-Cubillos *et al.*, 2015). Aparentemente, estas especies son más resilientes al efecto negativo de la pesca, posiblemente por su tamaño y una mayor capacidad reproductiva, por lo que pueden estar salvaguardando esta función y brindando una mayor redundancia funcional.

Burkepile y Hay (2010) demostraron que la complementariedad entre los peces loro mejora la resiliencia del arrecife. La presencia conjunta de *S. taeniopterus* y *S. aurofrenatum* causa cambios únicos y complementarios en la comunidad de algas. *S. taeniopterus* previene el establecimiento de las macroalgas y promueve el asentamiento de algas costosas coralinas en el nuevo sustrato disponible; pero su impacto es bajo en macroalgas ya establecidas que ocupan un sustrato antiguo. Por su parte, *S. aurofrenatum* reduce la abundancia de las macroalgas frondosas ya establecidas, pero se alimenta en menor proporción de algas filamentosas. Por lo tanto, este efecto en conjunto es crítico para la recuperación coralina luego de un disturbio.

Considerando que existen diferencias en la distribución espacial de las especies y, por tanto, de los grupos funcionales, en respuesta a factores como la disponibilidad de alimento, la preferencia de hábitat, entre otros (Burkepile *et al.*, 2018), se demostró que el grupo succionador de sedimentos

fue más abundante en la terraza prearrecifal y en la terraza lagunar, ya que su preferencia de hábitat es alrededor y en las zonas arenosas de los arrecifes, en donde hay mayor presencia de sedimentos y tapetes de algas cespitosas (Tebbet *et al.*, 2022). Por su parte, las especies cortadoras y los buscadores que se alimentan del cuerpo y tallo de macroalgas filamentosas y frondosas fueron más abundantes en la cuenca lagunar y en el arrecife periférico de barlovento. Finalmente, los bioerosionadores y raspadores que se alimentan de algas endolíticas y epilíticas fueron más frecuentes en ambientes expuestos, como el arrecife periférico de barlovento y la terraza de sotavento, aunque también se registraron en la cuenca lagunar (Burkepile *et al.*, 2018).

En términos generales, los arrecifes de Bolívar están definidos por una baja redundancia funcional, independientemente de la diversidad (Micheli y Halpern, 2005). Las diferencias entre la complementariedad entre el Caribe y el Indo-Pacífico son una consecuencia de la historia evolutiva, por encima de diferencias en el proceso de herbivoría. A través de esta perspectiva se corrobora que el Caribe tiene un alto grado de vulnerabilidad ante la pérdida de cualquier especie herbívora o peor, de un grupo funcional completo. La riqueza de las especies herbívoras son críticas para mantener la estructura y función de los arrecifes coralinos, razón por la que es de vital importancia mantener y salvaguardar la riqueza de géneros y especies. Lo anterior, entendiendo que la complementariedad brindada por los distintos modos de alimentación produce un efecto indirecto pero positivo en el asentamiento, mantenimiento y recuperación de los corales y por ende de todo el ecosistema arrecifal (Burkepile y Hay, 2010).

Tabla 5. Preferencia de hábitat, grupos funcionales y función ecosistémica que ejecutan las especies de herbívoros en los arrecifes coralinos del atolón de Bolívar.

Familia	Especie	Preferencia de hábitat	Grupo funcional	Función ecosistémica
Acanthuridae	<i>Acanthurus chirurgus</i>	Terraza lagunar	Succionador de sedimentos	Consumen películas de microalgas y material particulado de la superficie el sustrato blando (arena alrededor de los corales o sustrato mixto con cascajo y arena).
	<i>Acanthurus tractus</i>	Terraza prearrecifal		
	<i>Acanthurus coeruleus</i>	Terraza lagunar y cuenca lagunar	Cortador	Consumen algas usualmente filamentosas cortándolas por encima del sustrato.
Diadematidae	<i>Diadema antillarum</i> <i>Echinometra lucunter</i> <i>Echinometra viridis</i>	Cuenca lagunar	Pastoreador bioerosionador	Se alimentan de la matriz epilítica algal y los turf endolíticos de algas, mediante la perturbación o excavación más profunda del sustrato.
Cidaridae	<i>Eucidaris tribuloides</i>	Terraza prearrecifal y terraza de sotavento		
Kyphosidae	<i>Kyphosus</i> spp. <i>Kyphosus vaigiensis</i>	Terraza lagunar		
Mithracidae	<i>Maguimithrax spinosissimus</i>	Terraza lagunar y terraza prearrecifal	Buscador de macroalgas	Seleccionan componentes individuales de las algas y remueven solo el alga y el material epilítico.
Percnidae	<i>Percnon gibbesi</i>	Terraza lagunar		
	<i>Scarus coelestinus</i>	Cuenca lagunar y terraza prearrecifal	Pastoreador bioerosionador	Se alimentan de la matriz epilítica algal y los turf endolíticos de algas mediante la perturbación o excavación más profunda del sustrato.
	<i>Sparisoma viride</i>	Terraza lagunar	Pastoreador raspador	Se alimentan de la matriz epilítica algal y de los turf endolíticos de algas, pero solo perturban la superficie.
	<i>Scarus vetula</i>	Cuenca lagunar y terraza de sotavento		
	<i>Scarus iseri</i>	Cuenca lagunar		
	<i>Scarus</i>	Terraza prearrecifal		
	<i>taeniopterus</i>	Cuenca lagunar y terraza de sotavento		
	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	Cuenca lagunar		
	<i>Sparisoma atomarium</i>	Terraza prearrecifal y terraza lagunar	Buscador de macroalgas	Seleccionan componentes individuales de las algas y remueven solo el alga y el material epilítico.
	<i>Sparisoma chrysopterus</i>	Arrecife periférico de barlovento		
Labridae	<i>Sparisoma rubripinne</i>			

CONCLUSIONES

En los complejos arrecifales de Alburquerque, Bolívar y Bajo Nuevo, la cobertura del bentos estuvo dominado por organismos no constructores de arrecife, siendo los céspedes algales la comunidad dominante; mientras que los organismos constructores representaron menos del 26 %. Esta tendencia obedece en parte a una baja riqueza, abundancia y redundancia funcional de herbívoros, lo que reduce el control natural sobre las macroalgas. Adicionalmente, los brotes de enfermedades inducen pérdidas importantes de cobertura coralina, favoreciendo la proliferación de céspedes sobre el esqueleto expuesto. Estos resultados demuestran que en estos arrecifes el dominio coralino está cambiando al dominio de las macroalgas, trayectoria ya descrita en otros arrecifes del Caribe.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos los invaluable aportes de la Armada de Colombia (ARC), del personal de la Comisión Colombiana del Océano (CCO), encargados de coordinar las expediciones científicas Seaflower 2018, 2021 y 2022. Agradecemos a cada uno de los expedicionarios y personal de apoyo en campo, a Camila Gómez-Cubillos por la construcción de mapas y a Santiago Estrada por compartir su registro fotográfico.

FUENTE FINANCIADORA

Estas investigaciones han sido financiadas con recursos del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, a través del Programa Colombia Bio, la CCO y la Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias de Mar (Cecimar) (Hermes 50901 – 56730). Contribución # 572 del Cecimar.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: C. G. y C. D.; metodología: C. G., C. D. y S. Z.; análisis: C. G., C. D., L. F., M. B. y R. D.; investigación: C. G., C. D., L. F., M. B., R. D. y S. Z.; redacción - preparación del borrador original: C. G., C. D., L. F., M. B., R. D. y S. Z.; redacción - revisión y edición: C. G., C. D. y S. Z.; supervisión: S. Z.; administración del proyecto: S. Z. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril-Howard, A.; Orozco-Toro, C.; Bolaños-Cubillos, N.; Bent-Hooker, H. (2012). Primera aproximación al conocimiento de las comunidades coralinas de los complejos arrecifales de Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo – Colombia, sección norte de la Reserva de Biósfera Seaflower, Caribe Occidental. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 4: 51–65. <https://doi.org/10.15359/revmar.4.3>
- Acero, A.; Garzón-Ferreira, J. (1994). Descripción de una especie nueva de *Hypoplectrus* (Pisces: Serranidae) del Caribe Occidental y comentarios sobre las especies Colombianas del género. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 23(1): 5–14. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.1994.23.0.386>
- Adam, T. C.; Burkepile, D. E.; Ruttenberg, B. I.; Paddock, M. J. (2015). Herbivory and the resilience of Caribbean coral reefs: knowledge gaps and implications for management. *Marine Ecology Progress Series*, 520: 1 - 20. <https://doi.org/10.3354/meps11170>
- Alevizon, W.; Richardson, R.; Pitts, P.; Serviss, G. (1985). Coral zonation and patterns of community structure in Bahamian reef fishes. *Bulletin of Marine Science*, 36(2): 304–318.
- Balata, D.; Piazzini, L.; Rindi, F. (2011). Testing a new classification of morphological functional groups of marine macroalgae for the detection of responses to stress. *Marine Biology*, 158: 2459–2469. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1747-y>
- Bellwood, D. R.; Choat, J. H. (1990). A functional analysis of grazing in parrotfishes (family Scaridae): the ecological implications. *Environmental Biology of Fishes*, 28: 189–214. <https://doi.org/10.1007/bf00751035> https://doi.org/10.1007/978-94-009-2065-1_11
- Bellwood, D. R.; Hoey, A. S.; Choat, J. H. (2003). Limited functional redundancy in high diversity systems: resilience and ecosystem function on coral reefs. *Ecology Letters*, 6(4): 281–285. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00432.x>

- Bellwood, D. R.; Hughes, T. P.; Folke, C.; Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994): 827-833. <https://doi.org/10.1038/nature02691> PMID:15215854
- Bindoff, N. L.; Cheung, W. W. L.; Kairo, J. G.; Arstegui, J.; Guinder, V. A.; Hallberg, R.; Hilmi, N.; Jiao, N.; Karim, M. S.; Levin, L.; O'Donoghue, S.; Purca, C. S. R.; Rinkevich, B.; Suga, T.; Tagliabue, A.; Williamson, P. (2019). Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities. In: Pörtner, H. O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Minterbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama and N. Weyer (Eds.). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (pp. 447-587). IPCC.
- Bohnsack, J. A.; Bannerot, S. P. (1986). A stationary visual census technique for quantitatively assessing community structure of coral reef fishes. *NOAA Technical Report NMFS*, 41: 1-15.
- Bolaños-Cubillos, N.; Abril-Howard, A.; Hooker, H.; Caldas, J. P.; Acero, A. (2015). Lista de Peces Conocidos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Reserva De Biósfera Seaflower, Caribe Occidental Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44(1): 127-162. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.24>
- Borrero-Pérez, G. H.; Benavides-Serrato, M.; Campos, N. H.; Galeano-Galeano, E.; Gavio, B.; Medina, J.; Abril-Howard, A. (2019). Echinoderms of the Seaflower Biosphere Reserve: state of knowledge and new findings. *Frontiers in Marine Science*, 6: 188. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00188>
- Bortone, S.; Samoily, M.; Francour, P. (2000). Fish and macroinvertebrate evaluation methods. In Seaman WJr. (Ed.), *Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats* (127-164). CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781420036633> <https://doi.org/10.1201/9781420036633.ch5>
- Box, S. J.; Mumby, P. J. (2007). Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. *Marine Ecology Progress Series*, 342: 139-149. <https://doi.org/10.3354/meps342139>
- Brainard, R.; Maragos, J.; Schroeder, R.; Kenyon, J.; Vroom, P.; Godwin, S.; Kolinski, S. (2005). The state of coral reef ecosystems of the Pacific Remote Island Areas. In: Waddell J. (Eds.), *The state of coral reef ecosystems of the United States and Pacific Freely Associated States: 2005* (pp. 338-372). NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS.
- Bruckner, A. (2012). *Global Reef Expedition: San Andres Archipelago, Colombia*. Field Report. April 9-24, 2012. Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation, Landover MD. 52 pp.
- Bruckner, A. (2020). *How do you recognize and describe Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) lesions. Field diagnosis*. National Marine Sanctuaries and National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA. 42.
- Burkepile, D. E.; Hay, M. E. (2010). Impact of Herbivore Identity on Algal Succession and Coral Growth on a Caribbean Reef. *PLoS ONE*, 5(1): e8963. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008963> PMID:20126450
- Burkepile, D. E.; Rasher, D. B.; Adam, T. C.; Hoey, A. S.; Hay, M. E. (2018). Functional Variation among Parrotfishes: Are they Complementary or Redundant? In Hoey, A. and Bonaldo, R. (Eds.), *Biology of Parrotfishes* (pp. 134-160). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315118079-7>
- Caribbean Coastal Marine Productivity. (2001). *Methods manual levels 1 and 2: Manual of Methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean*. Caricom. University of South Florida.
- Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Aportes al conocimiento de la Reserva de la Biósfera Seaflower*. CCO.
- Cheal, A.; Emslie, M.; Miller, I.; Sweatman, H. (2012). The distribution of herbivorous fishes on the Great Barrier Reef. *Marine Biology*, 159: 1143-1154. <https://doi.org/10.1007/s00227-012-1893-x>

- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2011). Expedición Científica de recolección de datos biológicos a Serrana, Roncador y primera aproximación al conocimiento de las comunidades coralina e íctica de los complejos arrecifales de Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo – Colombia, sección norte de la Reserva de Biósfera Seaflower, Caribe occidental 2010. Coralina. 56 pp.
- Córdoba, J. A.; López, C. E. (1997). *Diagnóstico actual de las tortugas marinas, 1996, en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Tesis de grado Biología Marina. Universidad de Bogotá "Jorge Tadeo Lozano". Santa Marta, Colombia.
- Dainco. (1980). *Proyecto para el desarrollo de la pesca artesanal y la investigación en el archipiélago de San Andrés y Providencia*. Dainco.
- Díaz, J. M.; Díaz-Pulido, G.; Garzón-Ferreira, J.; Geister, J.; Sánchez M. J. A.; Zea, S. (1996). *Atlas de los Arrecifes Coralinos del Caribe Colombiano. I. Complejos Arrecifales oceánicos*. Serie Publicaciones Especiales Invemar, 2.
- Díaz, J.; Barrios, L.; Cendales, M.; Garzón-Ferreira, J.; Geister, J.; López-Victoria, M.; Ospina, G. H.; Parra-Velandia, F.; Pinzón, J.; Zapata, B.; Zea, S. (2000). *Áreas Coralinas de Colombia*. Invemar, Serie Publicaciones Especiales No. 5.
- Díaz, M. J. (2005). Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29(112): 357–369. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.29\(112\).2005.2170](https://doi.org/10.18257/raccefyn.29(112).2005.2170)
- Francis, F. T.; Filbee-Dexter, K.; Yan, H. F.; Côté, I. M. (2019). Invertebrate herbivores: Overlooked allies in the recovery of degraded coral reefs? *Global Ecology and Conservation*, 17: e00593. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00593>
- Garzón-Ferreira, J.; Gil-Agudelo, D. L.; Barrios, L. M.; Zea, S. (2001). Stony coral diseases observed in southwestern Caribbean reefs. *Hydrobiologia*, 460: 65–69. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3284-0_5
- Garzón-Ferreira, J.; Reyes-Nivia, M. C.; Rodríguez-Ramírez, A. (2002). *Manual de métodos del SIMAC – Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia*. Informe Final Invemar.
- Geister, J.; Díaz J. M. (2007). *Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Mar Caribe, Colombia)*. Ingeominas.
- Gil-Agudelo, D. L.; Navas-Camacho, R.; Rodríguez-Ramírez, A.; Reyes-Nivia, M. C.; Bejarano, S.; Garzón-Ferreira, J.; Smith, G. W. (2009). Enfermedades coralinas y su investigación en los arrecifes colombianos. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38(2): 189–224. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2009.38.2.178>
- Gómez-Cubillos, C.; Daza-Guerra, C. A.; Lozano-Mendoza, N. A.; Zea, S. (En prensa). Status of the coral formations of Bajo Nuevo reef complex, NW Caribbean, Colombia. *Revista de Biología Tropical*.
- Gómez-Cubillos, C.; Gómez-Cubillos, M. C.; Sanjuan-Muñoz, A.; Zea, S. (2019). Interacciones de corales masivos con céspedes algales y otros organismos en arrecifes del Parque Nacional Natural Tayrona. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 48(2): 143–171. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.770>
- Gómez-Cubillos, C.; Daza-Guerra, C. A.; Márquez, J. C.; Zea, S. (2023). Evaluación de interacciones entre corales masivos con otros organismos bentónicos. En: Sánchez J. A., M. A. Alvarado, L. F. Barrios y E. Ochoa (Eds.), *Manual de procedimientos y metodologías para buceo científico* (pp. 267–280), Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Gómez-Cubillos, C.; Gavio, B.; Zea, S. (2020). Estructura de la comunidad de céspedes algales en interacciones con corales masivos en arrecifes del Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 49: 45–72. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.suplesp.1053>

- Guarderas, A. P.; Hacker, S. D.; Lubchenco, J. (2008). Current status of marine protected areas in Latin America and the Caribbean. *Conservation Biology*, 22(6): 1630–1640. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01023.x>
- Guzmán, D.; Ruiz, J. F.; Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP)*. Informe técnico. Ideam.
- Guzmán, H. M.; Cortés, J. (1993). Arrecifes coralinos del Pacífico Oriental Tropical: revisión y perspectivas. *Revista de Biología Tropical*, 41(3A): 535–557.
- Harris, J. L. (2015). *The ecology of turf algae on coral reefs*. Doctoral thesis. University of California.
- International Coral Reef Initiative. (2016). *GCRMMN-CARIBBEAN Guidelines for coral reef biophysical monitoring*. ICRI. UNEP–ONU
- Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. (1986). *San Andrés y Providencia, aspectos geográficos*. IGAC.
- Jackson, J. B. C.; Donovan, M. K.; Cramer, K. L.; Lam, W. (Eds). (2014). *Status and trends of Caribbean coral reefs: 1970–2012*. IUCN.
- Johansson, C. L.; Van de Leemput, I. A.; Depczynski, M.; Hoey, A. S.; Bellwood, D. R. (2013). Key herbivores reveal limited functional redundancy on inshore coral reefs. *Coral Reefs*, 32: 963–972. <https://doi.org/10.1007/s00338-013-1044-y>
- Kuffner, I. B.; Walters, L. J.; Becerro, M. A.; Paul, V. J.; Ritson-Williams, R.; Beach, K. S. (2006). Inhibition of coral recruitment by macroalgae and cyanobacteria. *Marine Ecology Progress Series*, 323: 107–117. <https://doi.org/10.3354/meps323107>
- Lonin, S.; Andrade, C. A.; Monroy, J. (2022). Wave climate and the effect of induced currents over the barrier reef of the cays of Albuquerque Island, Colombia. *Sustainability*, 14(10): 6069. <https://doi.org/10.3390/su14106069>
- Lopera-García, L. F. (2020). *Conectividad hidrodinámica entre los cayos, bancos, islas y atolones que conforman la reserva de la Biósfera Seaflower y su potencial impacto en la conectividad biológica*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, Colombia.
- López, N.; Rodríguez, D.; Silva, C. C. (2004). Intraspecific morphological variation in turf-forming algal species. *Universidad y Ciencia*, (1): 7–15.
- López-Londoño, T.; Gómez-Campo, K.; Galindo-Martínez, C. T.; González-Guerrero, L. A.; Roitman, S.; Pollock, F. J.; Pizarro, V. C.; López-Victoria, M.; Medina, M. J.; Iglesias-Prieto, R. (2023). Sobrevivencia y respuestas fisiológicas de corales expuestos a elevada turbidez en el arrecife Varadero, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 52(1): 135–158. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2023.52.1.1192>
- Márquez, J. C.; Díaz, J. M. (2005). Interacciones entre corales y macroalgas: dependencia de las especies involucradas. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 34(1): 227–242. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2005.34.0.242>
- McGehee, M. A. (1994). Correspondence between assemblages of coral reef fishes and gradients of water motion, depth, and substrate size off Puerto Rico. *Marine Ecology-Progress Series*, 105: 243–243. <https://doi.org/10.3354/meps105243>
- Mejía, L. S.; Garzón-Ferreira, J. (2000). Estructura de comunidades de peces arrecifales en cuatro atolones del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Caribe suroccidental). *Revista de Biología Tropical*, 48(4): 883–896.
- Micheli, F.; Halpern, B. S. (2005). Low functional redundancy in coastal marine assemblages. *Ecology Letters*, 8(4): 391–400. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00731.x>
- Mumby, P. J.; Dahlgren, C. P.; Harborne, A. R.; Kappel, C. V.; Micheli, F.; Brumbaugh, D. R.; Holmes, K. E.; Mendes, J. M.; Broad, K.;

- Sanchirico, J. N.; Buch, K.; Box, S.; Stoffle, R. W.; Gill, A. B. (2006). Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs. *Science*, 311(5757): 98–101. <https://doi.org/10.1126/science.1121129> PMID:16400152
- Norström, A. V.; Nyström, M.; Lokrantz, J.; Folke, C. (2009). Alternative states on coral reefs: beyond coral–macroalgal phase shifts. *Marine Ecology Progress Series*, 376: 295–306. <https://doi.org/10.3354/meps07815>
- Nyström, M.; Folke, C.; Moberg, F. (2000). Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in ecology & evolution*, 15(10): 413–417. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(00\)01948-0](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(00)01948-0) PMID:10998519
- Perry, C. T.; Murphy, G. N.; Graham, N. A.; Wilson, S. K.; Januchowski-Hartley, F. A.; East, H. K. (2015). Remote coral reefs can sustain high growth potential and may match future sea-level trends. *Scientific Reports*, 5(1): 18289. <https://doi.org/10.1038/srep18289> PMID:26669758 PMCID:PMC4680928
- Raymundo, L. J.; Couch, C. S.; Harvell, C. D. (2008). *Coral disease handbook. Guidelines for assessment, monitoring and management*. Centre for Marine Studies, Gerhmann Building, The University of Queensland.
- Rivas, N.; Acero, A.; Tavera, J. J.; Abril-Howard, A.; Bolaños-Cubillos, N. (2020). Additions to the reef fish fauna of cayo Alburquerque, Seaflower Biosphere reserve (Colombian Caribbean). *Atoll Research Bulletin*, 627. <https://doi.org/10.5479/si.13350368>
- Roberts, C. M. (1995). Effects of fishing on the ecosystem structure of coral reefs. *Conservation Biology*, 9(5): 988–995. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.9050988.x> PMID:34261234
- Roff, G.; Mumby, P. J. (2012). Global disparity in the resilience of coral reefs. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(7): 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.04.007> PMID:22658876
- Santos-Martínez, A.; Gavio, B.; Prato, J.; Dorado, J.; Macaris, A. (2023). *Valoración de servicios ecosistémicos y diversidad biológica de los arrecifes de coral en los alrededores de la Isla Cayos de Bajo Nuevo, Reserva de la Biósfera Seaflower, Caribe colombiano*. Informe Final Expedición Científica Seaflower 2021-II – Isla Cayo de Bajo Nuevo. <https://n9.cl/fwi0q2>
- Smith, J. E.; Shaw, M.; Edwards, R. A.; Obura, D.; Pantos, O.; Sala, E.; Sandin, S. A.; Smriga, S.; Hatay, M.; Rohwer, F. L. (2006). Indirect effects of algae on coral: algae-mediated, microbe-induced coral mortality. *Ecology letters*, 9(7): 835–845. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00937.x> PMID:16796574
- Souter, D.; Planes, S.; Wicquart, J.; Logan, M.; Obura, D.; Staub, F. (Eds.). (2022). Status and trends of coral reefs of the Caribbean region (chapter 12). In: *Status of Coral Reef of the World: 2020* (pp. 150-171), GCRMN, ICRI, Australian Government, Australian Institute of Marine Science, UNEP, Government Offices of Sweden and Principauté de Monaco. <https://doi.org/10.59387/wotj9184>
- Souter, D.; Serge, P.; Wicquart, J.; Logan, M.; Obura, D.; Staub, F. (2021). *Status of Coral Reefs of the World: 2020 Executive Summary*. Coral Reef Initiative, Global Coral Reef Monitoring Network. <https://doi.org/10.59387/WOTJ9184>
- Spadaro, A. J.; Butler, M. J. (2021). Herbivorous crabs reverse the seaweed dilemma on coral reefs. *Current Biology*, 31(4): 853–859. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.10.097> PMID:33306950
- Tanner, J. E. (1995). Competition between scleractinian corals and macroalgae: an experimental investigation of coral growth, survival and reproduction. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 190(2): 151–168. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(95\)00027-0](https://doi.org/10.1016/0022-0981(95)00027-0)
- Taylor, E.; Howard, M.; Baine, M. (2011). *Colombia's Nomination of the Seaflower Marine Protected Area for Inscription on the World Heritage List*. Unesco. Paris, Francia.

- Tebbett, S. B.; Siqueira, A. C.; Bellwood, D. R.; (2022). The functional roles of surgeonfishes on coral reefs: past, present and future. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 32: 1–53. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09692-6>
- Vega-Sequeda, J.; Díaz-Sánchez, C. M.; Gómez-Campo, K.; López-Londoño, T.; Díaz-Ruiz, M.; Gómez-López, D. I. (2015). Biodiversidad Marina en Bajo Nuevo, Bajo Alicia y Banco Serranilla, Reserva de Biósfera Seaflower. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44(1): 199–224. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.27>
- Weil, E.; Rogers, C. S. (2011). Coral reef diseases in the Atlantic-caribbean. In Dubinsky, Z. and N. Stambler (Eds.), *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition* (pp. 465–491). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0114-4_27
- Weil, E.; Hernández-Delgado, E. A.; González, M.; Williams, S.; Suleiman-Ramos, S.; Figueroa, M.; Metz-Estrella, T. (2019). Spread of the new coral disease “SCTLD” into the Caribbean; implications for Puerto Rico. *Reef Encounter*, 34: 38–43.
- Williams, G. J.; Gove, J. M.; Eynaud, Y.; Zgliczynski, B. J.; Sandin, S. A. (2015). Local human impacts decouple natural biophysical relationships on Pacific coral reefs. *Ecography*, 38(8): 751–761. <https://doi.org/10.1111/ecog.01353>
- Williams, I. D.; Polunin, N. V.; Hendrick, V. J. (2001). Limits to grazing by herbivorous fishes and the impact of low coral cover on macroalgal abundance on a coral reef in Belize. *Marine Ecology Progress Series*, 222: 187–196. <https://doi.org/10.3354/meps222187>
- Williams, S. M. (2021). The reduction of harmful algae on Caribbean coral reefs through the reintroduction of a keystone herbivore, the long-spined sea urchin *Diadema antillarum*. *Restoration Ecology*, 30(1): e13475. <https://doi.org/10.1111/rec.13475>
- Zea, S. (2001). Patterns of sponge (Porifera, Demospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the southwestern Caribbean. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(97): 579–593. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.25\(97\).2001.2791](https://doi.org/10.18257/raccefyn.25(97).2001.2791)

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Ordenamiento Marino Costero: Visión de Autoridad Marítima en zonas insulares del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Caribe colombiano

Marine and Coastal Management: Vision of Maritime Authority in the San Andrés, Providencia, and Santa Catalina Archipelago in the Colombian Caribbean

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.636> Fecha de recepción: 2024-04-16 / Fecha de aceptación: 2024-09-04María Paula Molina-Jiménez¹, Lady Tatiana Pusquín-Ospina², Fernando Afanador-Franco³, Nery Sirley Barrientos-Porras⁴, Carlos Banda-Lepesquer⁵, Iván Fernando Castro-Mercado⁶

Citar como:

Molina-Jiménez, M. P.; Pusquín-Ospina, L. T.; Afanador-Franco, F.; Barrientos-Porras, N. S.; Banda-Lepesquer, C.; Castro-Mercado, I. F. (2024). Ordenamiento marino costero: visión de autoridad marítima en zonas insulares del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 43(1), 57-88. <https://doi.org/10.26640/22159045.2024.636>

RESUMEN

Los territorios insulares presentan una gran importancia debido a sus características ambientales, económicas y sociales, por lo que es necesario la planificación y gestión de sus espacios marinos y terrestres. En Colombia, el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina es uno de los principales destinos turísticos y en donde se desarrollan varias actividades marítimas que podrían generar conflicto entre ellas y afectar los diferentes ambientes naturales. El propósito de esta investigación fue aplicar la metodología del Ordenamiento Marino Costero: Visión de Autoridad Marítima (OMC:VAM), analizando las etapas de condiciones actuales y futuras entre usos/actividades marino-costeras presentes en las islas, como una herramienta para la toma de decisiones. Los resultados indicaron que los usos que más contribuyen al conflicto son las áreas restringidas: el área marina protegida, la zona de pesca artesanal y los corales; adicionalmente, se definieron las zonas más adecuadas para el desarrollo de actividades marítimas y su compatibilidad a partir del Modelo de Asignación y Colocalización (MAyC), estableciendo los porcentajes de zonas aptas para los usos de acuicultura (61.24 %), parques eólicos (48.02 %) y cables submarinos (48.32 %). Finalmente, con el establecimiento del Índice de Priorización para la Toma de Decisiones (IPTD), que determinó el grado de tendencia de desarrollo y representatividad de cada uso/actividad en el área, se consideró que la acuicultura es el sector con mayor tendencia de crecimiento con respecto a parques eólicos y cables submarinos.

PALABRAS CLAVE: ordenamiento marino costero; actividades marítimas; conflictos; asignación; colocalización; escenarios de desarrollo futuro; sistemas de información geográfica

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2089-0381>. Bióloga marina. M.Sc. en Ciencias Marinas. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: mmolina@dimar.mil.co

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8616-8661>. Geóloga Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: lpusquin@dimar.mil.co

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4708-3280>. Ingeniero Catastral y Geodesta, Especialista en Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos, Magister en Auditoría y Gestión Ambiental. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: Fernando.Afanador@dimar.mil.co

⁴ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7539-2841>. Ingeniera oceanográfica. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: nerjomc@gmail.com

⁵ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6817-2111>. Tecnólogo delineante de arquitectura e ingeniería. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: cbanda@dimar.mil.co

⁶ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6799-5036>. Ingeniero Geógrafo, M. Sc. en Auditoría de Gestión Ambiental. Dirección General Marítima. Correo electrónico: ICastroM@dimar.mil.co



Publicado por la Dimar

ABSTRACT

Island territories hold significant importance due to their environmental, economic, and social characteristics, making it necessary to plan and manage their marine and terrestrial spaces. In Colombia, the Archipelago of San Andrés, Providencia, and Santa Catalina stands as a primary tourist destination, hosting various maritime activities that have the potential to generate conflicts and impact diverse natural environments. The purpose of this research was to apply the methodology of Marine and Coastal Management: Vision of Maritime Authority (MCM:VMA), methodology to analyze the current and future conditions of marine-coastal uses and activities within the islands, as a tool for decision making. Results from this research reveal that the primary contributors to conflict include restricted areas, the Marine Protected Area, the artisanal fishing zone, and the coral reefs. Furthermore, the most suitable zones for the development of maritime activities and their compatibility were defined on the basis of the Allocation and Co-location Model (MAYC in Spanish), the study established the percentages of suitable areas for aquaculture (61.24%), offshore wind farms (48.02%), and submarine cables (48.32%). Finally, through the implementation of the Prioritization Index for Decision Making (IPTD in Spanish) which determined the degree of development trend and representativeness of each use/activity in the area, aquaculture emerges as the sector with the highest growth potential when compared to offshore wind farms and submarine cables.

KEYWORDS: *Marine and coastal management; maritime activities; conflicts; allocation; co-location; future development scenarios; Geographic Information Systems*

INTRODUCCIÓN

En las zonas insulares el crecimiento de los sectores relacionados con turismo, pesca, comercio y agricultura, entre otros, así como el desarrollo urbanístico, han generado presión sobre los recursos marinos; sumado a lo anterior, la falta de planes de gestión que involucren componentes tanto marinos como terrestres han provocado incompatibilidades entre las actividades marítimas, los ecosistemas y los diferentes actores (Aldana y Hernández, 2016; Gallego-Cosme, 2014).

En Colombia, el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina no es ajeno a esta problemática, ya que en sus áreas marino-costeras se han desarrollado de manera desorganizada múltiples actividades, debido principalmente a que su plan de ordenamiento territorial (POT) llegó a demorarse alrededor de 15 años (1989-2003) para ser aprobado (Ramírez-Charry, 2019). A su vez, el incremento de la población, que según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) fue un 2.86 % entre los años 2005 a 2018 (Gobernación Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2021) ha provocado que se generen mayores conflictos de uso por el espacio (Christie, Smyth, Barnes y Elliott, 2014).

Es por esto por lo que la Dirección General Marítima (Dimar), como Autoridad Marítima Nacional, responsable de la ejecución de la política del Estado colombiano en esta materia, a través de la regulación y coordinación de las actividades marítimas (Decreto Ley N°. 2324,1984), la misión, la visión, los principios institucionales, los intereses marítimos, las estrategias de desarrollo institucional proyectadas hacia el año 2042 (Dimar, 2022); y lo establecido en el Conpes 3990 (DNP, 2020a) ha abordado el "Ordenamiento Marino Costero: Visión de Autoridad Marítima (OMC:VAM)", que busca:

"[...] analizar y asignar distribuciones temporales y espaciales de actividades humanas en aguas jurisdiccionales y zonas costeras colombianas, con el fin de lograr la consolidación del país como una potencia biooceánica bajo un enfoque holístico y de seguridad integral marítima, fluvial y portuaria; así como también, de una estrategia y estructura marítima nacionales, garantizando los principios ecológicos, económicos y sociales" (Afanador-Franco, Molina-Jiménez, Pusquín-Ospina, Escobar-Olaya y Castro-Mercado, 2019).

Asimismo, el OMC:VAM, debido a la contingencia por la COVID-19 que afectó la economía mundial, consideró la tendencia de desarrollo futuro de las

actividades marino-costeras a partir del análisis de crecimiento global bajo escenarios con y sin pandemia, para facilitar la toma de decisiones enfocadas a mejorar las condiciones actuales y futuras del espacio marítimo (Ehler y Douvere, 2009; McGowan, Jay y Kidd, 2019; Scenari Introduction, 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, desde el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), se llevó a cabo la aplicación de la metodología OMC:VAM en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, como una contribución que facilite la gestión del territorio a los tomadores de decisiones, por ser una zona con gran importancia ambiental y alta oferta de planes turísticos.

Según la Asociación Colombiana de Viajes y Turismo (Anato, 2023), el archipiélago es el sexto departamento con mayor llegada de turistas, tanto nacionales como internacionales, y se considera el más dependiente del turismo en el país, ya que se estima que el 70 % de su economía gira alrededor de esta actividad (Gobernación Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2019). Asimismo, la pesca representa una actividad económica importante; sin embargo, no es suficiente para abastecer las necesidades de la comunidad, por esta razón la implementación de proyectos de acuicultura podría ser una opción con la cual los pescadores están de acuerdo para mejorar sus condiciones y las del medio (Gobernación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, s. f.; Sarmiento-Guerrero y Pérez-Walteros, 2021). En cuanto a la generación de energía, se está buscando cambiar el uso de combustible fósil por energías renovables que permitan satisfacer las necesidades de los isleños, disminuir costos y reducir la dependencia del diésel (Arias y Duffis, 2017; Más Comunidad, 2023). Adicionalmente, por su ubicación geográfica, los cables submarinos constituyen una herramienta importante para establecer las telecomunicaciones necesarias para la conectividad, el acceso a la información y para afrontar cualquier situación que se presente en las islas (Asomovil, 2021).

En esta investigación se aplicó la metodología del OMC:VAM a partir de lo establecido en las publicaciones denominadas: 'Conflictos de uso en el proceso de Ordenamiento Marino Costero:

Visión de Autoridad Marítima. Departamento de Bolívar-Colombia' (Afanador-Franco *et al.*, 2019), 'Ordenamiento Marino Costero: Visión de Autoridad Marítima. Caso Departamento de Bolívar, Colombia' (Afanador-Franco *et al.*, 2021), 'Modelo de asignación y colocalización de actividades marítimas para el ordenamiento marino costero en el departamento de Bolívar, Colombia' (Afanador-Franco *et al.*, 2022), 'Zonificación de actividades marítimas bajo escenarios de desarrollo futuro en los departamentos de Bolívar, Sucre y Córdoba, Colombia' (Afanador-Franco, Molina-Jiménez, Pusquín-Ospina, Barrientos, Banda-Lepesquer y Castro-Mercado, 2023).

ÁREA DE ESTUDIO

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está ubicado en el mar Caribe, al noroccidente de Colombia, entre los 12° y 16° de latitud norte y entre los 78° y 82° longitud oeste (Fig. 1), ocupando un área de 180 000 km². Fue declarado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), en el año 2000, como Reserva de la Biósfera Seaflower, debido a su importancia para los ecosistemas marinos y costeros. Comprende las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, las islas Cayos del Este Sudeste, Cayos de Serranilla, Cayos de Alburquerque, Cayos de Roncador, Cayos de Quitasueño, Cayos de Serrana, y los bajos Alicia y Bajo Nuevo (Carvajal, 2009; CCO, 2015; CCO, s. f.; Decreto 1946 de 2013; Díaz, 2005).

Posee una gran riqueza en biodiversidad marina e importantes ecosistemas como el manglar, arrecifes coralinos y pastos marinos, entre otros; se caracteriza por presentar un clima húmedo desde mayo hasta noviembre, y un clima seco desde diciembre hasta abril, influenciado por los vientos Alisios del NE; con una temperatura promedio de 28°C y una humedad alta durante la mayor parte del año (Dagua, Torres y Monroy, 2018). Adicionalmente, se encuentra situado dentro del cinturón de huracanes del Caribe, lo cual se hace evidente con el paso de varios de estos eventos a lo largo de la historia, con una ocurrencia hasta el año 2010 de aproximadamente 0.54 eventos/año, de los cuales solo algunos han llegado hasta la costa (CIOH, 2010; Ortiz-Royero, 2012; Ortiz-Royero, Plazas y Lizano, 2015; Rey *et al.*, 2019; Rey *et al.*, 2021).

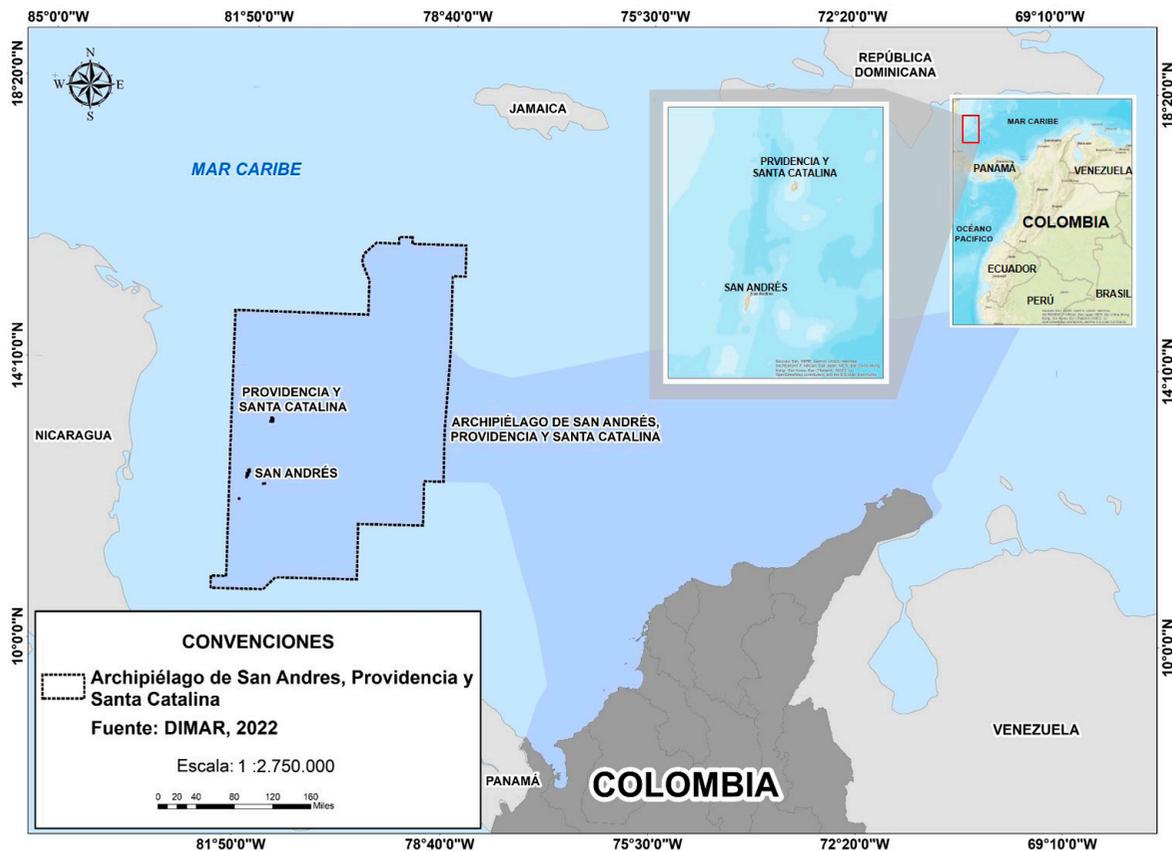


Figura 1. Localización del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se encuentra ubicado en el alto de Nicaragua, al noroeste de la cuenca Colombia y presenta una tendencia NNE- SSW con un origen volcánico en el cenozoico temprano, representado por flujos de lava y depósitos piroclásticos y epiclásticos; posteriormente, la subsidencia de estos volcanes y la depositación de calizas arrecifales definieron los rasgos geomorfológicos que se observan hasta ahora (Carvajal, 2009; Case *et al.*, 1990 en Idárraga-García, García-Varón y León-Rincón, 2021; Dimar-CIOH, 2013; Geister y Díaz, 2007; Idárraga-García y León-Rincón, 2019; Milliman y Supko, 1968, en Díaz, 2005).

De acuerdo con Idárraga-García *et al.* (2021), el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina corresponde a la provincia geomorfológica denominada Provincia Volcánica del Occidente del Caribe, la cual se encuentra representada por geoformas de origen volcánico y estructural, como montes submarinos, guyots, espolones, picos volcánicos, cuencas limitadas por fallas y columnas

estructurales. En cuanto a la geomorfología costera, se diferencian unidades asociadas a costas bajas y costas altas, como playas, lagunas costeras, barras litorales, barras arrecifales, dunas, llanuras de inundación, sistemas de lomas y colinas, plataformas de abrasión elevada y terrazas coralinas (Carvajal, 2009; Dimar-CIOH, 2013).

METODOLOGÍA

El OMC:VAM en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se aplicó siguiendo la metodología propuesta por la Dimar en Afanador-Franco *et al.* (2019, 2021, 2022 y 2023), la cual consiste en las siguientes etapas:

Establecimiento de los elementos de gobernanza

En donde se estableció el objetivo estratégico de convertir al país en una potencia biooceánica, alineado con el Plan Nacional de Desarrollo - Colombia Potencia Mundial de la Vida 2022-2026, en sus ejes de transformación de ordenamiento

alrededor del agua y transformación productiva, internacionalización y acción climática. Adicionalmente, se definieron una serie de aspectos técnicos como las escalas de representación, las diferentes clases de usos/actividades, conformación cartográfica y documentación espacial.

Etapa de preplaneación

En esta fase se identificaron, por medio de información secundaria, los actores primarios que utilizan directamente los recursos y pueden contribuir a los conflictos, y secundarios, correspondientes a las diferentes entidades que regulan las actividades presentes en el archipiélago, dando respuesta a las siguientes preguntas: ¿Quiénes deben ser involucrados en el proceso?, ¿cuándo deben ser convocados al proceso? y ¿cuál es la forma en que deben ser involucrados? (Maguire, Potts y Fletcher, 2012; Afanador-Franco *et al.*, 2019; 2021).

Análisis de condiciones actuales relacionadas con conflictos

Se realizó la documentación espacial y fotográfica de las actividades marino-costeras, a través de trabajo de campo, realizando encuestas mediante la herramienta Survey 123 de ArcGIS, en la que se definieron las categorías de uso/actividad, teniendo en cuenta lo establecido en el Decreto Ley 2324/84.

De acuerdo con la información anterior y por medio del juicio de expertos, se aplicó el análisis multicriterio basado en el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process: AHP), que consiste en establecer comparaciones entre pares de usos a través de valores relativos empleando una escala de importancia (Afanador-Franco *et al.*, 2019, 2021), los cuales se presentaron en una matriz cruzada de compensación de parejas, en la que se analizaron los cruces entre los usos en el área de estudio y se definieron las superposiciones conflictos.

Adicionalmente, se realizaron tres matrices correspondientes a: *i*) Matriz de justificación, en la que se explicó de forma breve la razón de la asignación de los valores de importancia, *ii*) Matriz normalizada de compensación por parejas, en la que, a partir de un proceso matemático, los valores asignados en la primera matriz se ajustaron a un rango entre 0 y 1, y *iii*) Matriz de pesos, en la que

se calcularon los pesos de cada uso, promediando sus respectivos conflictos y se identificaron los usos que más contribuyen al conflicto.

A continuación, por medio de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), se realizaron dos aproximaciones para visualizar y presentar la distribución espacial de los conflictos; la primera consistió en cuantificar el índice de conflicto entre pares de usos, teniendo en cuenta los pesos de cada uno. Y la segunda analizó la cantidad de superposiciones entre los usos que tienen más conflictos.

Finalmente, se generaron los mapas correspondientes a cada una de las aproximaciones y se definieron las áreas libres en las que no se presentaron usos y conflictos, y pueden ser aptas para el desarrollo de futuras actividades marítimas. El proceso detallado de esta etapa está descrito en Afanador-Franco *et al.*, 2019, 2021 (Fig. 2).

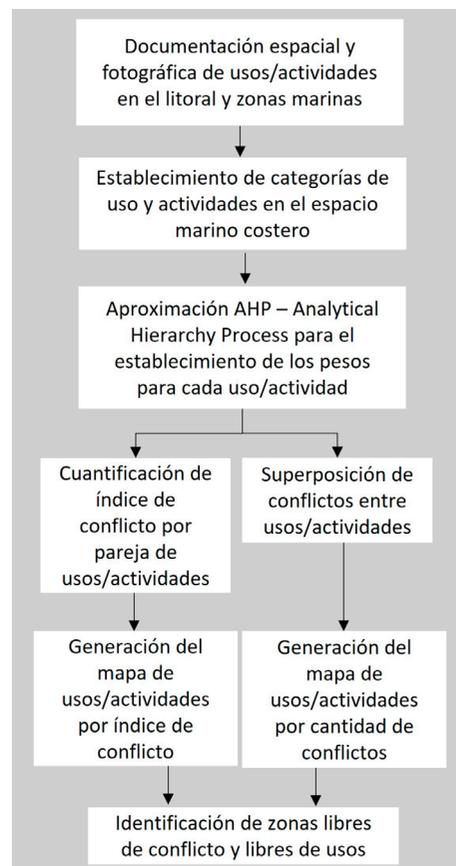


Figura 2. Proceso metodológico para el análisis de condiciones actuales relacionadas con conflictos.

ANÁLISIS DE CONDICIONES FUTURAS

En esta etapa (Fig. 3) se implementó el Modelo de Asignación y Colocalización (MAYC), con el que se busca establecer espacialmente la mejor ubicación de usos con tendencia al desarrollo, en lugares que cumplen con ciertos criterios técnicos y ambientales, y se plantean escenarios que permiten identificar oportunidades, conflictos

y compatibilidades para orientar la toma de decisiones (Afanador-Franco *et al.*, 2021).

En este caso se consideraron los escenarios antes y después de la pandemia por la COVID-19, y se evaluaron las características de crecimiento y desarrollo futuro para los usos de acuicultura, parques eólicos y cables submarinos (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023).

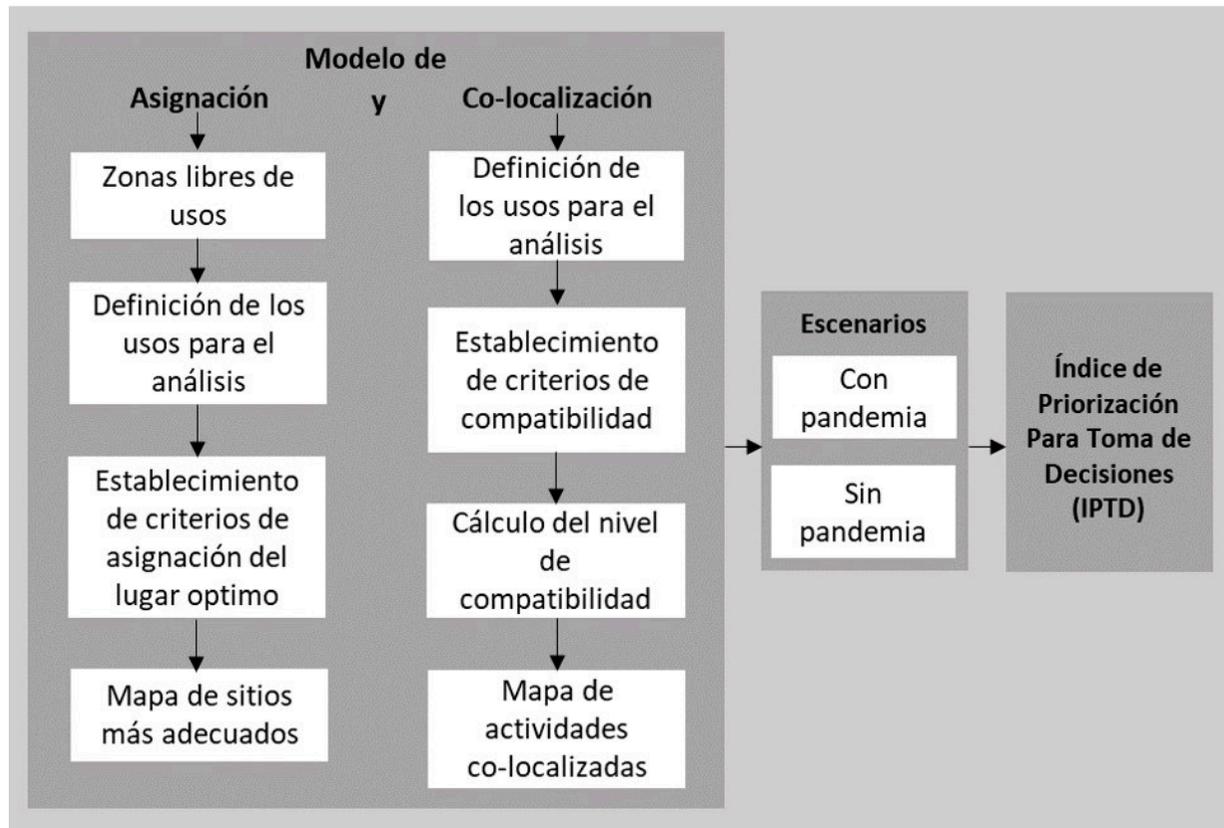


Figura 3. Proceso metodológico para el análisis de condiciones futuras.

Análisis de asignación. Se establecieron los criterios técnicos y ambientales (profundidad, tipo de fondo, corrientes, oleaje, entre otros) por medio de información bibliográfica, juicio de expertos y disponibilidad de datos, los cuales se subdividieron en subcriterios de condiciones aptas, medianamente aptas y no aptas; y, a través de herramientas SIG, se cruzaron para determinar la localización de las posibles zonas aptas para el desarrollo futuro de un uso en áreas libres de actividades marítimas presentes en la actualidad. El proceso detallado de esta etapa está descrito en Afanador-Franco *et al.*, 2022.

Análisis de colocalización. En esta etapa se buscó el desarrollo de usos en un mismo espacio geográfico minimizando sus conflictos, por medio de una escala de compatibilidad entre pares de usos que evalúa los efectos positivos y/o adversos, para lo cual se construyó una matriz con los criterios establecidos en el análisis de asignación y con variables de eficiencia y eficacia (proximidad a las costa, vocación turística, calidad del agua, entre otras) definidas para cada uso. El proceso detallado de esta etapa está descrito en Afanador-Franco *et al.*, 2022.

Escenarios de desarrollo futuro y porcentaje de tendencia futura. Se definieron los escenarios de: *i)* Crecimiento Global Sin Pandemia, en la que se supone que no se presentó la pandemia de la COVID-19 y que las tendencias de crecimiento de actividades marítimas se mantendrán hasta el año 2030. *ii)* Crecimiento Global Con Pandemia, que estimó la recuperación de las tendencias de desarrollo futuro marítimo durante la COVID-19 hasta 2030. Para cada actividad se estableció, por medio de información bibliográfica, el porcentaje de tendencia futura bajo cada escenario (Afanador-Franco, Molina-Jiménez, Pusquín-Ospina, Barrientos, Banda-Lepesquer y Castro-Mercado, 2023).

Determinación del Índice de Priorización para la Toma de Decisiones (IPTD). Teniendo en cuenta el análisis MAYC y los escenarios definidos para cada actividad se calculó el IPTD, a partir de la tendencia de desarrollo y la relación entre el área de la zona apta y el área total de estudio, lo cual permite definir entre varias actividades a cuál se le debería dar prioridad en caso de que se presenten varias solicitudes del espacio para desarrollarse al mismo tiempo (Afanador-Franco *et al.*, 2023).

Para calcular el IPTD entre varios usos se realizó una normalización, en la que los valores cercanos a 1 indican cual uso se debe priorizar, ya que tiene mayor tendencia de crecimiento y representatividad. El proceso detallado de esta etapa está descrito en Afanador-Franco *et al.*, 2023.

RESULTADOS

Elementos de gobernanza

En el OMC:VAM se identificaron decretos, políticas, convenios y/o acuerdos nacionales e internacionales como:

- Decreto Ley 2324 del año 1984, donde se establece que la Dirección General Marítima tiene por objeto la regulación, dirección, coordinación y control de las actividades marítimas.
- Decreto 5057 de 2009, que define las funciones del Director General Marítimo, especificando la responsabilidad de planear, dirigir, coordinar y evaluar la reglamentación para el desarrollo, control y vigilancia de las actividades marítimas.

- Plan Estratégico de la Dimar 2042 (Dimar, 2022), que define los objetivos estratégicos correspondientes a “direccionar la promoción y desarrollo seguro y sostenible de actividades marítimas” e “incidir en el ámbito nacional e internacional para consolidar los intereses marítimos”.
- Política General de Ordenamiento Territorial (PGOT) (DNP, 2020b), que tiene como objetivo “orientar la organización física, socioespacial y políticoadministrativa del territorio nacional.
- Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros (Pnoec) (CCO, 2018) y el Consejo Nacional de Política Económica y Social Conpes-3990 (DNP, 2020a) que estipulan el objetivo interinstitucional de convertir a Colombia en una potencia biooceánica, a través de la conexión del territorio continental al territorio oceánico.
- Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (DNP, 2023), que establece los ejes de transformación relacionados con ordenamiento del territorio alrededor del agua (enfoque funcional de ordenamiento del territorio) y transformación productiva, internacionalización y acción climática (uso de energías limpias).
- Convenio Internacional sobre Seguridad de la Vida Humana en el Mar de 1974 y el protocolo de 1978 SOLAS 74/78, relacionado con las normas que deben cumplir los buques mercantes para efectuar una navegación con seguridad.
- Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación del Mar por Buques, el cual se centra en temas de contaminación por hidrocarburos, el manejo de sustancias nocivas líquidas, el transporte de sustancias perjudiciales, aguas sucias y basuras de los buques: MARPOL 73/78.

Adicionalmente, la información sobre las actividades marítimas se recopiló a partir de datos disponibles de diferentes entidades a nivel nacional relacionadas con la gestión y ordenamiento de los espacios marinos costeros, y para una representación adecuada de los usos/actividades identificados entre el límite de los bienes de uso público y las 200 millas náuticas se utilizaron escalas entre: 1:1 750 y 1:820 000, bajo el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS con origen único (CTM12) (Afanador-Franco *et al.*, 2019, 2021).

Preplaneación

Para efectos del desarrollo del ordenamiento marino costero, en el área de estudio del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se identificaron 517 actores primarios relacionados con actividades como pesca (1), operadores turísticos (3), hoteles (188), restaurantes (161), deportes náuticos (29), sector comercial (74), marinas (8), sector institucional (49), cooperativas (1), cables submarinos (3) y (32) actores secundarios de diferentes sectores como defensa, ambiente, turismo, pesca y telecomunicaciones, a los cuales se les divulgará los resultados obtenidos durante el OMC:VAM con el fin de retroalimentar el proceso (Afanador-Franco *et al.*, 2019, 2021).

Condiciones actuales relacionadas con conflictos

Las categorías de usos/actividades se establecieron de acuerdo con el Decreto Ley 2324 de 1984, correspondiente a las actividades marítimas en las que tiene injerencia la Dimar,

usos del suelo y una base natural clasificada por la función ecosistémica, de acuerdo con lo establecido por De Groot, Wilson y Boumans (2002) y Portman (2016). Se identificaron 38 usos/actividades, los cuales corresponden a 32 usos categorizados en 11 actividades marítimas y 6 usos incluidos en la clasificación de usos del suelo.

La información se recopiló a partir de bases de datos disponibles de diferentes entidades como Dimar, Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Plan de Ordenamiento Territorial de Providencia, Tremarctos Colombia 3.0, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Sistema de Información para la Gestión de los Manglares de Colombia (SIGMA), el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (Invemar), el Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (Incoder) y la Universidad de Bogotá “Jorge Tadeo Lozano” (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías de usos/actividades para la zona marino costera del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Ítem	Actividades marítimas (Decreto Ley 2324/84)	Uso/actividad
1	Señalización Marítima	Boyas y faros
2	Control del tráfico marítimo	Áreas de fondeo
3		Canales de navegación
4	Construcción, operación y administración de instalaciones portuarias	Concesiones portuarias
5	Administración y desarrollo de la zona costera	Concesión marítima emisarios submarinos
6		Concesión marítima hoteles
7		Concesión marítima restaurantes
8		Concesión marítima marinas -embarcaderos
9	Colocación de cualquier tipo de estructuras, obras fijas o semifijas en el suelo o en el subsuelo marinos	Cables submarinos
10		Tubería submarina
11	Conservación, preservación y protección del medio marino	Especies amenazadas
12		Concentración de aves
13		Concentración de mamíferos
14		Concentración de reptiles
15		Parques nacionales regionales
16		Parques nacionales naturales
17		Área marina protegida
18		Pastos marinos
19		Corales
20		Zona pesca artesanal
21		Zona de pesca blanca

Ítem	Actividades marítimas (Decreto Ley 2324/84)	Uso/actividad
22	Utilización, protección y preservación de los litorales	Bienes de uso público - playas
23		Bienes de uso público - bajamares
24		Manglar
25	Búsqueda y extracción o recuperación de antigüedades o tesoros náufragos	Naufragios
26	Recreación y deporte náutico marino	Buceo
27		Zona para deportes náuticos
28	Rellenos dragados y obras de ingeniería oceánica	Obras de protección costera
29		Rellenos dragados y obras de ingeniería oceánica
30	Otros usos y/o aprovechamiento marino	Áreas restringidas
31		Ruta de pesca blanca
32		Arrecifes artificiales
33	Usos del suelo	Zona urbana
34		Turismo
35		Institucional
36		Ganadería
37		Agricultura
38		Playas con vocación turística

De acuerdo con lo obtenido mediante la aproximación AHP los usos que más contribuyen al conflicto corresponden a las áreas restringidas, las áreas marinas protegidas, zona de pesca artesanal, playas con vocación turística y corales (Tabla 2, Fig. 4). Por otra parte, las actividades marítimas con mayor cantidad de conflictos identificados a partir de las superposiciones para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa

Catalina corresponden a la zona de pesca artesanal, áreas restringidas, área marina protegida, pastos marinos y corales (Tabla 3, Fig. 5).

Finalmente, se generó el mapa de zonas libres de conflicto y el mapa de zonas libres de usos, como resultado de un proceso con herramientas de SIG en el cual se extraen las áreas ocupadas por los conflictos y por los diferentes usos/ actividades, respectivamente (figuras 6 y 7).

Tabla 2. Usos que más contribuyen al conflicto en la zona marino costera del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Uso/actividad	Pesos
Áreas restringidas	0.1221
Área marina protegida	0.0988
Zona pesca artesanal	0.0833
Playas con vocación turística	0.0553
Corales	0.0459

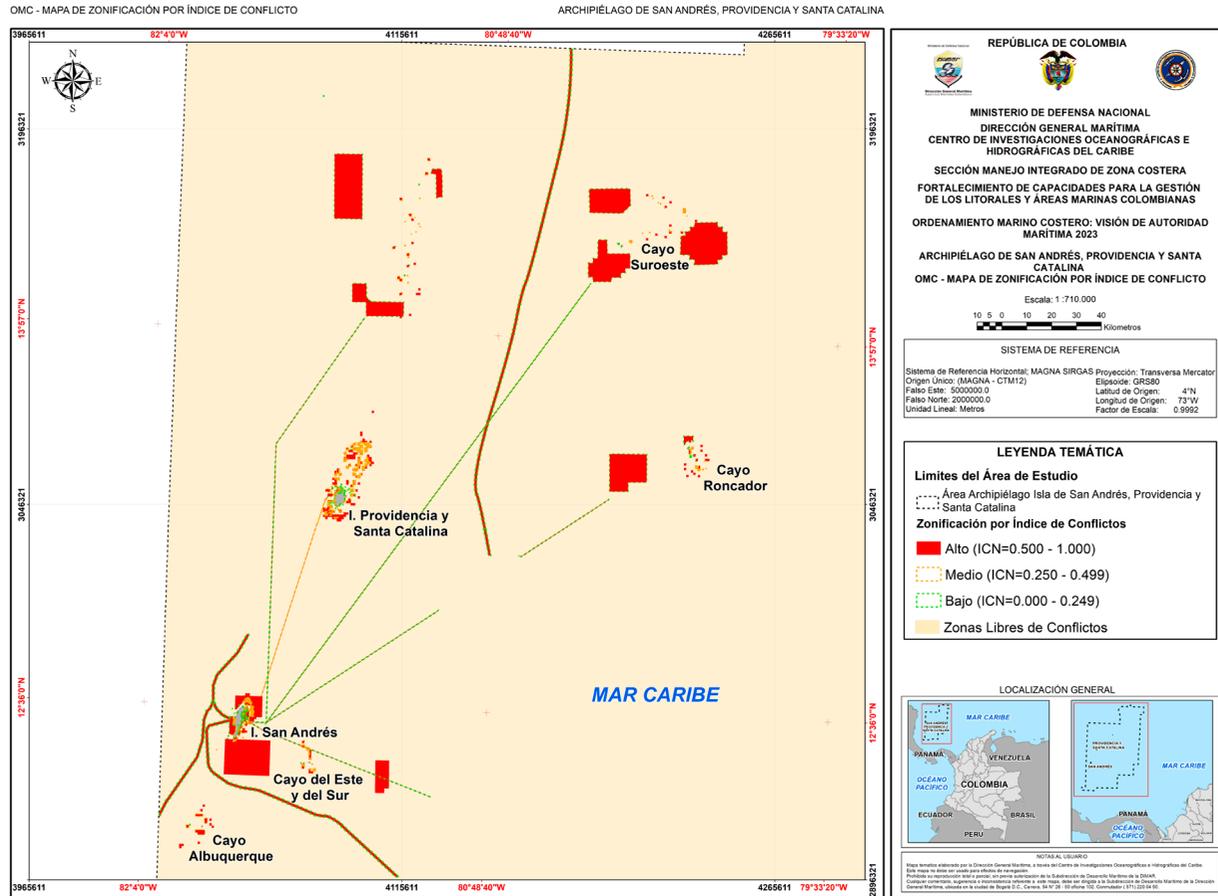


Figura 4. Mapa de zonificación por índice de conflictos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Tabla 3. Usos con más superposiciones en la zona marino costera del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Uso/actividad	Conflictos
Zona pesca artesanal	19
Áreas restringidas	19
Área marina protegida	17
Pastos marinos	15
Corales	15

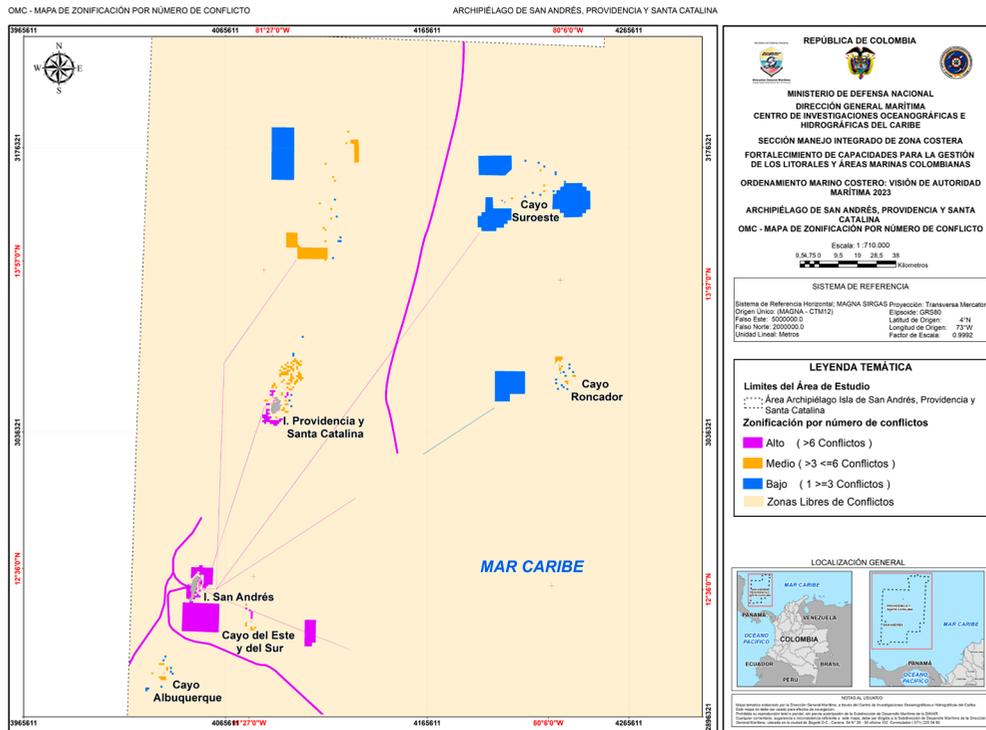


Figura 5. Mapa de zonificación por número de conflictos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

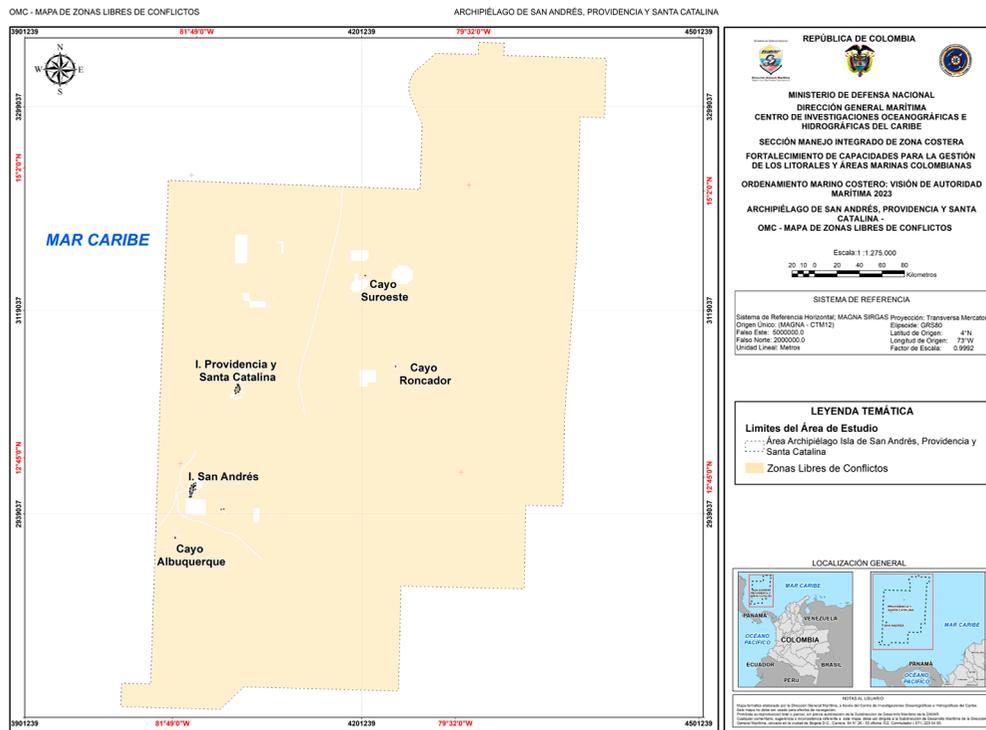


Figura 6. Mapa de zonas libres de conflictos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

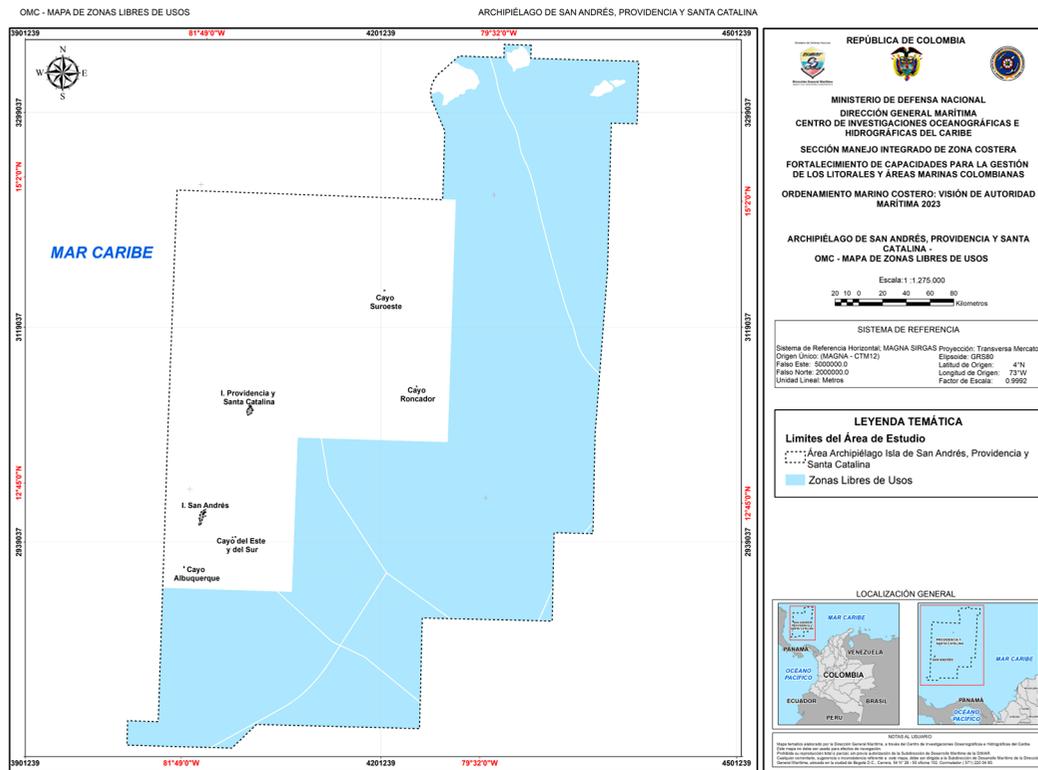


Figura 7. Mapa de zonas libres de usos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Condiciones futuras

Asignación. Se seleccionaron las actividades de acuicultura, parques eólicos y cables submarinos debido a que presentan mayor tendencia de desarrollo futuro en términos tanto económicos como sociales, y se establecieron las zonas más adecuadas para su ubicación y desarrollo en el área de estudio (Afanador-Franco *et al.*, 2022).

Acuicultura. La determinación de las zonas aptas para el desarrollo futuro de la acuicultura se definió utilizando los criterios y datos oceanográficos disponibles: tipo de fondo marino, periodo de oleaje, altura de ola significativa, corrientes y los posibles efectos sobre los sedimentos. Para este caso la profundidad no se tuvo en cuenta, debido a que varía dependiendo de las especies que se vayan a cultivar (Tabla 4; Fig. 8).

Tabla 4. Criterios técnicos y ambientales empleados en el establecimiento de las zonas más adecuadas para el desarrollo de acuicultura.

Criterio	Peso del criterio	Subcriterios	Peso del subcriterio	Categoría	* Peso Ponderado	Fuente
Tipo de fondo marino	0.20	a) Arenosos	0.5	Apto	0.100	Meindl, 1996; Rojo, 2016; Cardia, Ciattaglia y Corner, 2017; Ivars, 2017; Queensland Government, 2019
		b) Rocosos	0.35	Mediana-mente apto	0.070	
Periodo de oleaje (T)	0.12	a) $1.9 s < T \leq 359 s$	0.5	Apto	0.060	Munk, 1950 en Palomino, Almazán y Arrayás, 2001; Rubino, 2008; Cavia del Olmo, 2009; Kapetsky, Aguilar y Jenness, 2013; COWI y Ernst, 2013; López y Ruiz, 2015

Criterio	Peso del criterio	Subcriterios	Peso del subcriterio	Categoría	* Peso Ponderado	Fuente
Altura de ola significativa (Hs)	0.13	a) $0.59 \text{ m} < Hs \leq 6.9 \text{ m}$	0.5	Apto	0.065	Munk, 1950 en Palomino, <i>et al.</i> , 2001; Rubino, 2008; Cavia del Olmo, 2009; Kapetsky <i>et al.</i> , 2013; COWI y Ernst, 2013; López y Ruiz, 2015
Velocidad de la corriente (Wc)	0.25	a) $0.13 \text{ m/s} < Wc \leq 1 \text{ m/s}$ (Media)	0.5	Apto	0.125	Milne, 1976; Carroll, Cochrane, Fieler, Velvin y White, 2003; Stiggebrandt, 2011; Kapetsky <i>et al.</i> , 2013; COWI y Ernst, 2013; López y Ruiz, 2015
		b) $0 \text{ m/s} \leq Wc \leq 0.13 \text{ m/s}$ (Lenta)	0.35	Medianamente apto	0.087	
Destrucción directa	0.30	a) Sedimentos	0.4	Apto	0.120	Handy y Poxton, 1993; Boyd, 1995; FAO, 2006; Pérez, García, Invers y Ruiz, 2008; Herbeck, Unger, Wu y Jennerjahn, 2013; Rabasso, 2016

**peso ponderado*=*peso del criterio* x *peso subcriterio*

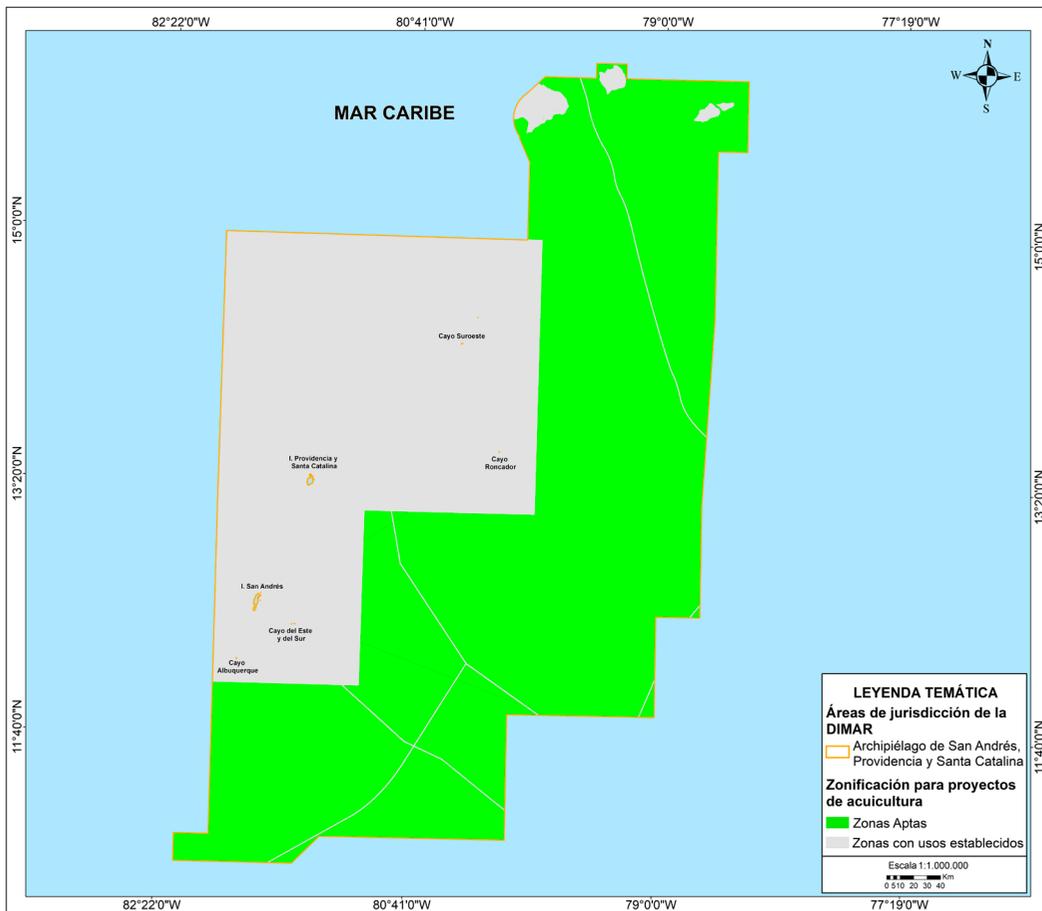


Figura 8. Mapa de localización de zonas aptas para el desarrollo de proyectos de acuicultura en la jurisdicción del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Parques eólicos. Los criterios utilizados para la ubicación óptima de parques eólicos fueron: profundidad, corrientes, altura de ola significativa, velocidad del viento a una altitud de 150 m con

respecto al nivel del mar, tipo y pendiente de fondo, además de los posibles efectos sobre los sedimentos (Tabla 5; Fig. 9).

Tabla 5. Criterios técnicos y ambientales empleados en el establecimiento de las zonas más adecuadas para el desarrollo de parques eólicos.

Criterios	Peso del criterio	Subcriterios	Peso del subcriterio	Categoría	*Peso ponderado	Fuente
Profundidad (P)	0.25	a) 0 m - 60 m	0.7	Apto	0.175	Usón, 2014; Fugro Marine GeoServices Inc., 2017; Vagiona y Kamilakis, 2018
		b) > 60 m	0.3	Medianamente apto	0.075	
Tipo de fondo marino	0.12	a) Arenosos	0.5	Apto	0.060	Boehlert y Gill, 2010; Prado, 2018; Xu <i>et al.</i> , 2020
		b) Fangos y limos	0.35	Medianamente apto	0.042	
Pendiente del fondo marino (Pf)	0.11	a) 0 % - 3 %	0.5	Apto	0.055	Malhotra, 2010; Xu <i>et al.</i> , 2020
		b) 3 % < x ≤ 12 %	0.35	Medianamente apto	0.038	
Velocidad de la corriente (Wc)	0.03	a) 0 - 1.75 m/s	0.7	Apto	0.021	Kapetsky <i>et al.</i> , 2013; González, 2007; Esteban, 2009; Loughney, Wang, Bashir, Armin y Yang, 2021
		b) > 1.75 m/s	0.3	Medianamente apto	0.009	
Altura de ola significativa (Hs)	0.04	a) 0 - 5 m	0.5	Apto	0.020	Loughney, <i>et al.</i> , 2021
		b) 5 m < Hs ≤ 8 m	0.35	Medianamente apto	0.014	
Velocidad del viento (V)	0.28	a) >8 m/s	0.8	Apto	0.224	Baban y Parry, 2001; Sesma, 2020
Destrucción directa	0.09	a) Sedimentos	0.5	Apto	0.045	Mariyasu, Allain, Benhalima y Claytor, 2004; Inger <i>et al.</i> , 2009; Wilhelmsson <i>et al.</i> , 2010
Generación de plumas de sedimentos	0.08	a) Arenas	0.6	Apto	0.048	NOAA, 2007; Vaselli, Bertocci, Maggi y Benedetti-Cecchi, 2008

**peso ponderado*=*peso del criterio* x *peso subcriterio*

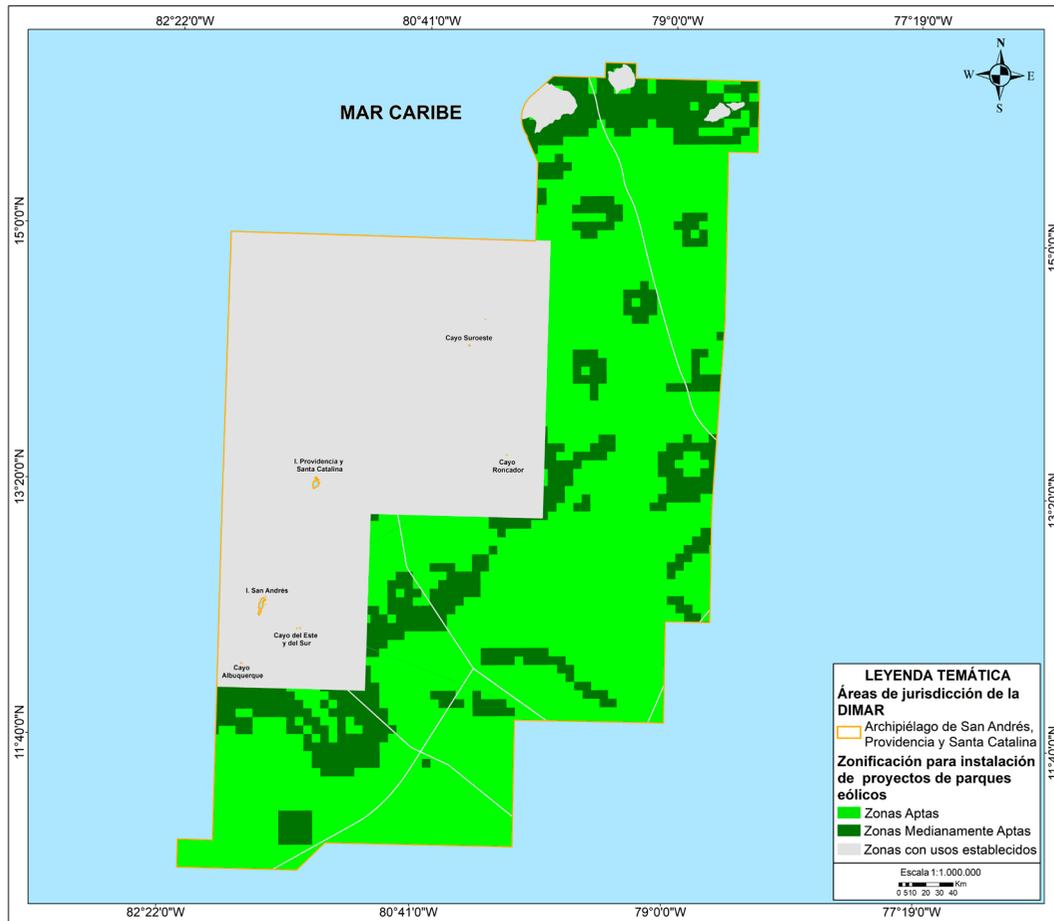


Figura 9. Mapa de localización de zonas aptas y medianamente aptas para el desarrollo de parques eólicos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Cables submarinos. La determinación de las zonas aptas para el desarrollo futuro de cables submarinos se definió utilizando criterios y datos oceanográficos disponibles, pendiente y tipo de

fondo marino, periodo de oleaje, altura de ola significativa, corrientes, los posibles efectos sobre ecosistemas marino costeros y la generación de plumas de sedimentos (Tabla 6; Fig. 10).

Tabla 6. Criterios técnicos y ambientales empleados en el establecimiento de las zonas más adecuadas para el desarrollo de cables submarinos.

Criterios	Peso del criterio	Subcriterios	Peso del subcriterio	Categoría	*Peso ponderado	Fuente
Pendiente del fondo marino (Pf)	0.25	a) $Pf \leq 3\%$	0.5	Apto	0.125	Carter et al. (2009), Álvarez (2017); Taormina, et al., (2018).
		b) $3\% < Pf \leq 12\%$	0.35	Medianamente apto	0.0875	
Tipo de fondo marino	0.20	a) Arenosos	0.5	Apto	0.1	Almazán, Palomino y García, (2000); Carter, et al. (2009); Worzyk (2009); Álvarez (2017)
		b) Fangos y limos	0.35	Medianamente apto	0.07	
Corrientes profundas (Wc)	0.10	a) $0 \text{ m/s} \leq Wc \leq 1.75 \text{ m/s}$	0.6	Apto	0.06	Carter et al. (2009); Cavia del Olmo (2009); Guande, Yancong, Peng, Chengkai, Xiaoli y Yang, (2013)
		b) $Wc > 1.75 \text{ m/s}$	0.4	Medianamente apto	0.04	

Criterios	Peso del criterio	Subcriterios	Peso del subcriterio	Categoría	*Peso ponderado	Fuente
Periodo de oleaje (T)	0.05	a) $T \leq 1.9$ s	0.5	Apto	0.025	Munk (1950) en Palomino, <i>et al.</i> , (2001); Carter, <i>et al.</i> (2009), y Cavia del Olmo (2009).
		b) 1.9 s < $T \leq 359$ s	0.35	Medianamente apto	0.0175	
Altura de ola significativa (Hs)	0.07	a) $Hs \leq 0.59$ m	0.5	Apto	0.035	Carter <i>et al.</i> , (2009) y Cavia del Olmo (2009)
		b) 0.59 m < $Hs \leq 6.9$ m	0.35	Medianamente apto	0.0245	
Destrucción directa	0.18	a) Sedimentos	0.5	Apto	0.09	Carter <i>et al.</i> (2009); Andrulewicz, Napierska y Otremba, (2002); Taormina <i>et al.</i> , (2018)
Generación de plumas de sedimentos	0.15	a) Arenas	0.6	Apto	0.09	Taormina <i>et al.</i> , (2018); OSPAR (2009); ESSO (2008); Newcombe y MacDonald (1991); Pinilla, Gutiérrez y Ulloa-Delgado (2007)

*peso ponderado=peso del criterio x peso subcriterio

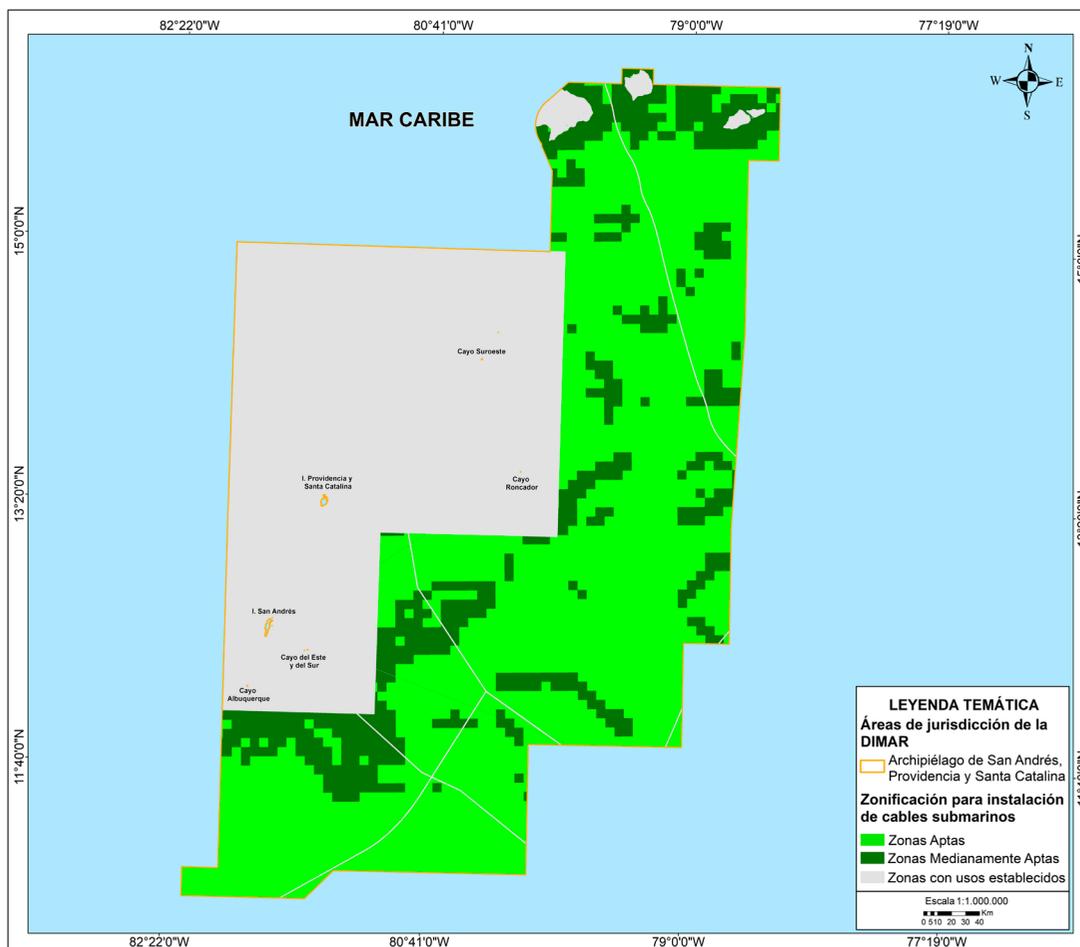


Figura 10. Mapa de localización de zonas aptas y medianamente aptas para la instalación de cables submarinos en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

COLOCALIZACIÓN

Este análisis se basó en la elaboración de una matriz cruzada entre pares de usos (acuicultura, marinas-embarcaderos, cables submarinos y parques eólicos), y tuvo en cuenta el promedio de los valores obtenidos de los criterios técnicos/ ambientales y las variables de eficiencia/eficacia

establecidas mediante juicio de expertos, para determinar si los dos usos se mejoran mutuamente, no interfieren el uno con el otro o se afectan negativamente, en donde valores cercanos a 1 indican mayor compatibilidad entre las actividades marítimas (Afanador-Franco *et al.*, 2022) (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis del nivel de compatibilidad de los usos evaluados.

Usos	Criterios técnicos y ambientales	Variables de eficiencia y eficacia	Promedio	Expresión de compatibilidad/ incompatibilidad
Acuicultura vs. parque eólico	0.080	0.750	0.415	Condicionamente incompatible
Acuicultura vs. cables submarinos	0.075	0.750	0.412	Condicionamente incompatible
Parque eólico vs. cables submarinos	0.100	1.000	0.550	Condicionamente compatible

Adicionalmente, teniendo en cuenta los dos escenarios establecidos, se realizó el cálculo del IPTD que refleja tanto el grado de tendencia de desarrollo para acuicultura, parques eólicos *offshore* y cables submarinos, como la representatividad entre cada par de usos (tablas

8 a 10 y figuras 11 a 13) (Afanador-Franco *et al.*, 2023; Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2020; Echeberría, 2020; GWEC, 2019, 2021; FAO, 2016, 2020; Research and Markets, 2020, 2022; TeleGeography, 2022).

Tabla 8. Índice de Priorización para la toma de decisiones bajo los escenarios sin pandemia y con pandemia para los usos de acuicultura y parques eólicos *offshore*.

Escenario	Uso/actividad	Tendencia de crecimiento (%)	Área total de las zonas aptas (km ²)	IPTD	IPTD Normalizado
Sin pandemia	Acuicultura zonas aptas	46 (FAO 2016, 2020)	101663.8963	0.4597	0.7302
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas Aptas	17 (GWEC, 2019)	79717.3333	0.1332	0.2116
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas medianamente aptas	17 (GWEC, 2019)	21933.91055	0.0367	0.0582
Con pandemia	Acuicultura zonas aptas	42 (FAO 2020).	101663.8963	0.4197	0.5834
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas aptas	30 (GWEC 2021).	79717.3333	0.2351	0.3267
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas medianamente aptas	30 (GWEC 2021).	21933.91055	0.0647	0.0899

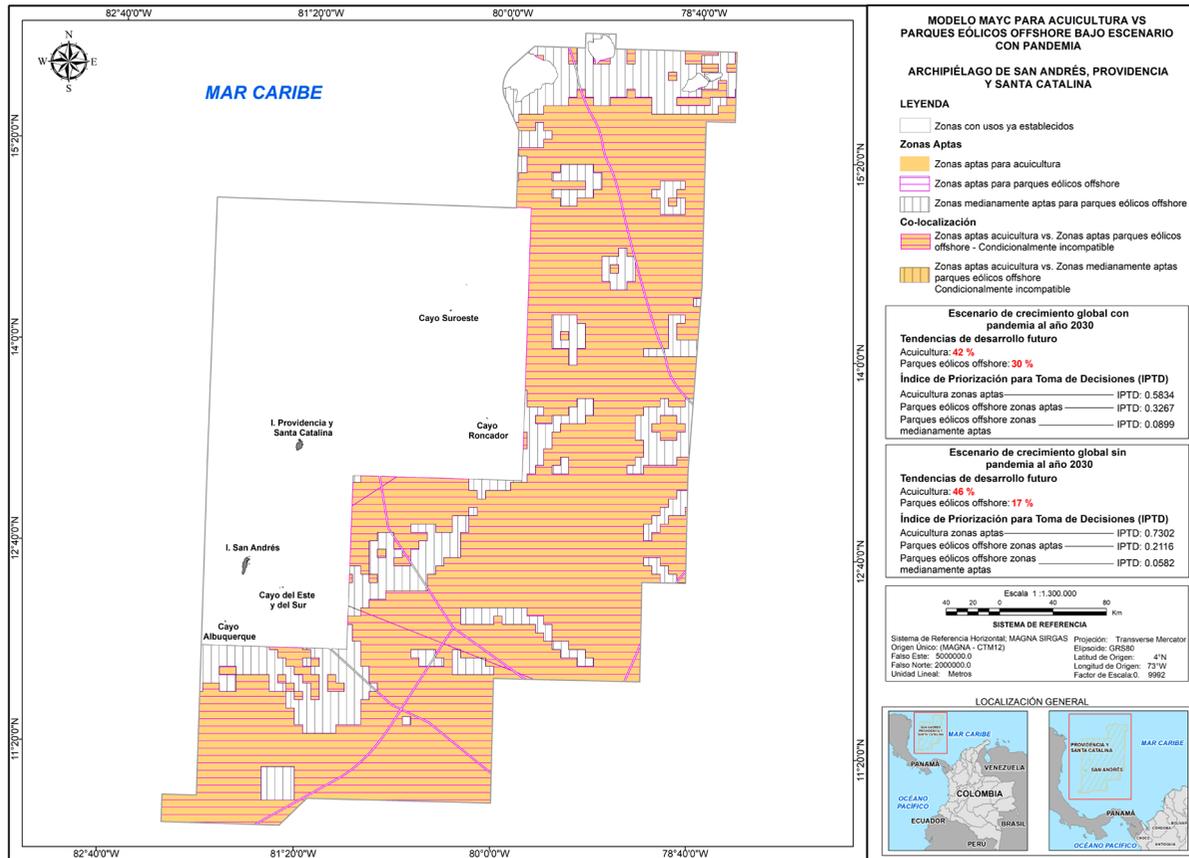


Figura 11. Mapa de condiciones futuras para acuicultura y parques eólicos *offshore* en el escenario con y sin pandemia del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Tabla 9. Índice de Priorización para la toma de decisiones bajo los escenarios sin pandemia y con pandemia para los usos de acuicultura y cables submarinos.

Escenario	Uso/actividad	Tendencia de crecimiento (%)	Área total de las zonas aptas (km ²)	IPTD	IPTD Normalizado
Sin pandemia	Acuicultura zonas aptas	46 (FAO 2016, 2020).	101663.8963	0.4597	0.9350
	Cables submarinos zonas aptas	3.2 (Echeberría 2020; Research and Markets 2020).	80219.62134	0.0252	0.0513
	Cables submarinos zonas medianamente aptas	3.2 (Echeberría 2020; Research and Markets 2020).	21433.62719	0.0067	0.0137
Con pandemia	Acuicultura zonas aptas	42 (FAO 2020)	101663.8963	0.4197	0.8607
	Cables submarinos zonas aptas	6.8 (Research and Markets 2022; TeleGeography 2022).	80219.62134	0.0536	0.1100
	Cables submarinos zonas medianamente aptas	6.8 (Research and Markets 2022; TeleGeography 2022).	21433.62719	0.0143	0.0294

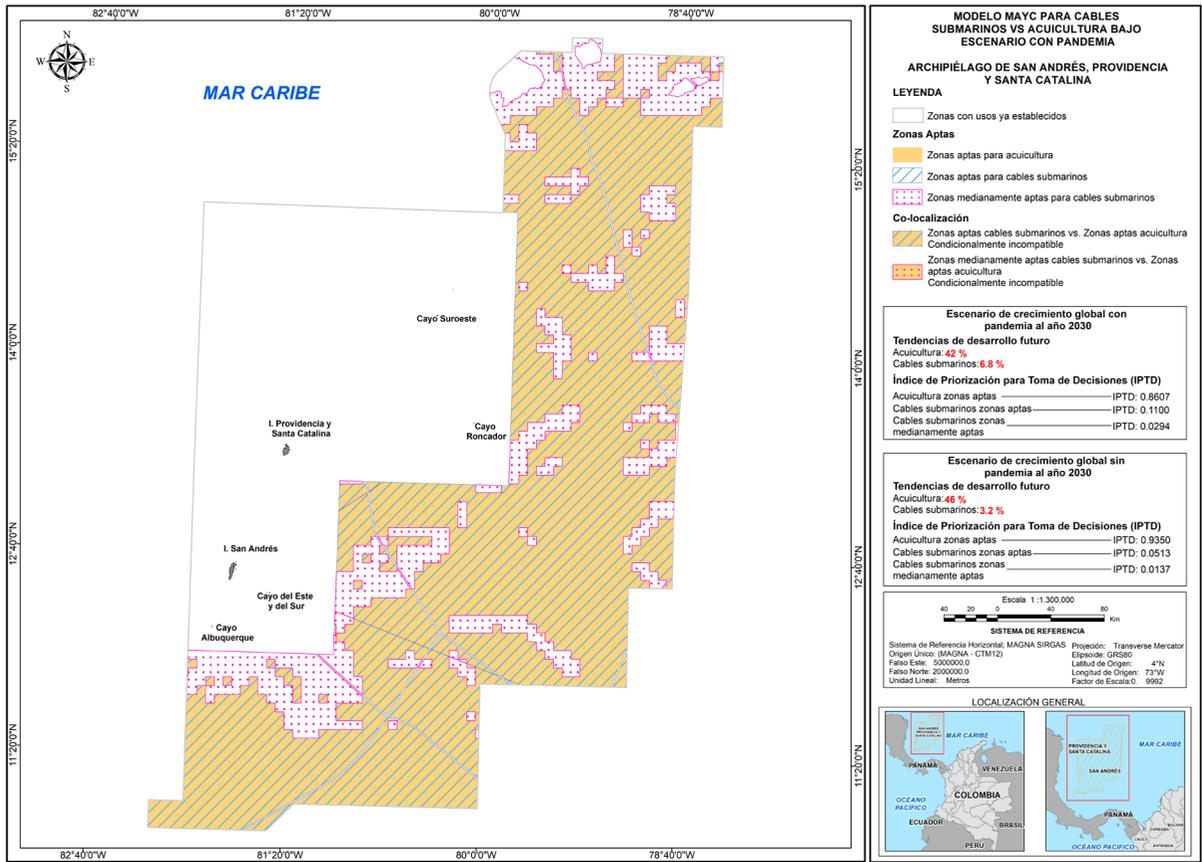


Figura 12. Mapa de condiciones futuras para acuicultura y cables submarinos en el escenario con y sin pandemia del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Tabla 10. Índice de Priorización para la toma de decisiones bajo los escenarios sin pandemia y con pandemia para los usos de cables submarinos y parques eólicos *offshore*.

Escenario	Uso/actividad	Tendencia de crecimiento (%)	Área total de las zonas aptas (km ²)	IPTD	IPTD Normalizado
Sin pandemia	Cables submarinos zonas aptas	3.2 (Echeberría 2020; Research and Markets 2020).	80219.62134	0.0252	0.1250
	Cables submarinos zonas medianamente aptas	3.2 (Echeberría 2020; Research and Markets 2020).	21433.62719	0.0067	0.0334
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas aptas	17 (GWEC 2019).	79717.3333	0.1332	0.6600
	Parques eólicos <i>offshore</i> zonas medianamente aptas	17 (GWEC 2019).	21933.91055	0.0367	0.1816

Escenario	Uso/actividad	Tendencia de crecimiento (%)	Área total de las zonas aptas (km ²)	IPTD	IPTD Normalizado
Con pandemia	Cables submarinos zonas aptas	6.8 (Research and Markets 2022; TeleGeography 2022).	80219.62134	0.0536	0.1458
	Cables submarinos zonas medianamente aptas	6.8 (Research and Markets 2022; TeleGeography 2022).	21433.62719	0.0143	0.0390
	Parques eólicos offshore zonas aptas	30 (GWEC 2021).	79717.3333	0.2351	0.6393
	Parques eólicos offshore zonas medianamente aptas	30	21933.91055	0.0647	0.1759

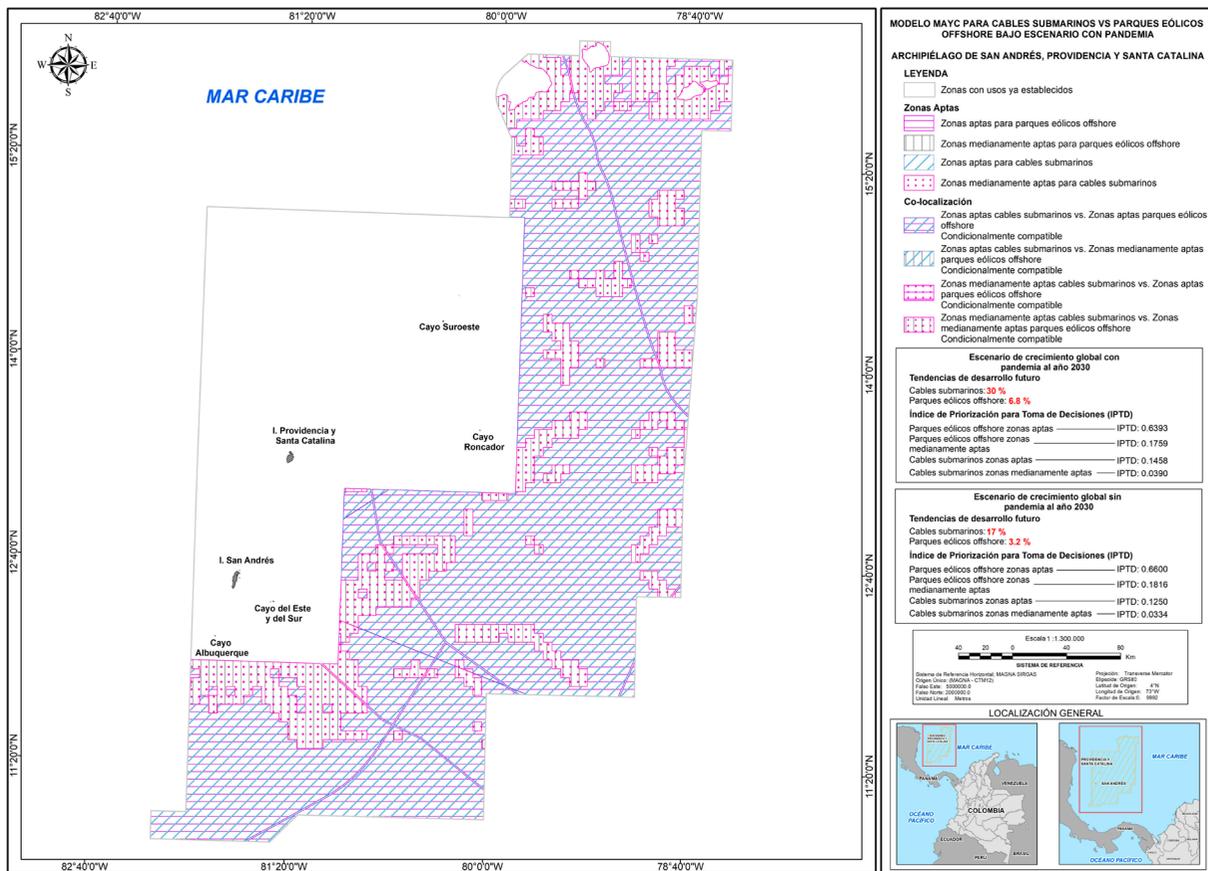


Figura 13. Mapa de condiciones futuras para cables submarinos y parques eólicos offshore en el escenario con y sin pandemia del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

DISCUSIÓN

En los últimos 20 años la mitad de los lugares del mundo con zonas marino-costeras han implementado la Planificación Espacial Marina como una herramienta para la gestión de estos espacios, con el fin de buscar un equilibrio entre la conservación de los ecosistemas y el desarrollo socioeconómico. En Colombia la Dimar, teniendo como base la PEM, ha implementado su metodología con un enfoque cuantitativo en diferentes áreas geográficas; sin embargo, se ha evidenciado que en países subdesarrollados e islas pequeñas estos procesos se ven afectados por factores como el cambio climático, los desastres naturales y, principalmente, la falta de información espacial relacionada con aspectos culturales, económicos, ecológicos y sociales (Ban, Hansen, Jones y Vincent, 2009; Ehler, 2021; Mead, 2021). Asimismo, algunas zonas insulares pueden llegar a tener un área marina mucho mayor que su parte terrestre, lo que dificulta la gestión de los recursos marinos (Jumeau, 2013).

Aunque en las islas pequeñas los avances en la PEM son pocos, por las diferentes limitaciones, en algunas islas del Caribe como República Dominicana, Santa Lucía, las islas Granadinas, Barbuda, Montserrat, Saint Kitts y Nevis, se ha implementado teniendo progresos significativos en la última década (Flower *et al.*, 2019; Mahadeo, 2022; Pomeroy, Baldwin y Mc. Conney, 2014; Programa Ambiental del Caribe, 2019; Díaz-Romero, Domínguez-Tejo y Schill, 2012; The Nature Conservancy, 2012); asimismo, en islas de Asia, la Polinesia Francesa y el Reino Unido, entre otros (André, Van Wynsberge, Chinain, Gatti, Liao y Andréfouët, 2022; Hardman *et al.*, 2022; Sujadmi y Murtasidin, 2020), han aplicado estos instrumentos de planificación que pueden llegar a ser referente para las demás zonas insulares.

En general, a nivel mundial, las actividades económicas que se desarrollan en zonas insulares están relacionadas principalmente con el sector turístico y pesquero (André *et al.*, 2022; Flower *et al.*, 2019; Pratt, 2015); sin embargo, debido a las limitaciones propias de estos espacios insulares la economía depende de inversiones externas y de las actividades que se desarrollan principalmente en el espacio marino (André *et al.*, 2022; Flower *et al.*, 2019; Greenhill y Pro, 2018; Pratt, 2015). El archipiélago de San Andrés, Providencia y

Santa Catalina no es la excepción, en razón a que es considerado uno de los principales destinos turísticos de Colombia y su economía gira alrededor de esta actividad, así como de la pesca y el comercio (Aguilera-Díaz, 2016).

Adicionalmente, parte del territorio marítimo del archipiélago está protegido bajo las figuras de 'área marina protegida', 'parque nacional natural' y 'parque nacional regional', con gran variedad de ecosistemas que proporcionan servicios como: alimentación, recreación, protección costera, entre otros. Sin embargo, de acuerdo con el análisis del OMC:VAM se identificó que estas áreas presentan un alto grado de conflicto con usos como la pesca artesanal, playas con vocación turística, rellenos, dragados y obras de ingeniería oceánica, debido a que sus regulaciones limitan el desarrollo de estas actividades (Coralina, 2018; Sánchez, 2012).

Pese a las actividades marítimas que se desarrollan actualmente en San Andrés, Providencia y Santa Catalina, uno de los retos del OMC:VAM es identificar el potencial de nuevos usos/actividades y establecer si las características físicas y ambientales del área marina son las adecuadas para su funcionamiento (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023), aportando a la diversificación de la economía y al mejoramiento de las condiciones de la población.

Teniendo en cuenta lo anterior, actividades como la acuicultura, parques eólicos y cables submarinos presentan una alta tendencia de crecimiento al año 2030, por su importancia en cuanto a la seguridad alimentaria, generación de energías limpias y la prestación de servicios de telecomunicación (Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2020; Echeberría, 2020; FAO, 2016, 2020; GWEC, 2019, 2021; Research and Markets, 2020, 2022; TeleGeography, 2022). En el archipiélago no se llevan a cabo proyectos de acuicultura (Merino, Bonilla y Bages, 2013), sin embargo, de acuerdo a Hortúa (2013) y a los resultados correspondientes a las zonas aptas obtenidas en este estudio, se considera que el área tiene un potencial alto para su desarrollo; aun así, es posible que la normatividad vigente, la falta de investigación e inversión, tanto del sector privado como público, sumado a los costos de transporte, construcción y funcionamiento no han permitido la ejecución de esta actividad en estas

islas (Decreto N°. 2668 de 2012, Gobernación Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2020; Greenhill y Pro, 2018; Merino *et al.*, 2013; Sarmiento-Guerrero, Pérez-Walteros, 2021).

Con respecto a los parques eólicos *offshore*, en Colombia, solo hasta el año 2022 se establecieron los lineamientos para la asignación de áreas en los departamentos de Bolívar y Atlántico (Resolución N°. 40284 de 2022), por lo que todavía no existen estos tipos de proyectos. En el archipiélago el suministro de energía tiene una cobertura total; no obstante, depende principalmente de combustibles fósiles que producen una alta contaminación atmosférica (aproximadamente 134 mil toneladas de CO₂ al año), por lo que se ha evidenciado un esfuerzo hacia la generación de energías limpias. Prueba de ello es el resultado de este estudio que indica que existe un área de 79 717.33 km² de zonas aptas (condiciones físicas y ambientales) que corresponden al 48.02 % del total del área, y los estudios que señalan el potencial de energía eólica en San Andrés, identificando un posible ahorro del 8 % de las emisiones de CO₂ que actualmente emite la isla (BID, 2016; Grueso-López, 2022). Igualmente, se han adelantado estudios para el aprovechamiento del recurso eólico y solar coordinados por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), destacando una propuesta de energía eólica que se encuentra en la etapa de viabilidad técnica (Matiz-Chicacausa *et al.*, 2016; SENA, 2013); sin embargo, la construcción de estos proyectos a gran escala y en zonas aisladas podría tener costos muy altos que dificultan su ejecución (BID, 2016; Gómez, 2022).

En cuanto a cables submarinos, antes del año 2020 el archipiélago contaba con uno solo (San Andrés Isla Tolú Submarine Cable - SAIT) y se presentaban problemas de conectividad, principalmente asociados a la saturación de la red y a las características limitantes para la instalación de nuevos cables como la ubicación geográfica, los altos costos de infraestructura y transporte (Martínez, 2017; MinTIC, 2020); sin embargo, a partir del año 2020, después de huracán IOTA, se instaló un nuevo cable submarino (America Movil Submarine Cable System-1, AMX-1) que generó un avance en materia de telecomunicaciones, aumentado la conexión nacional e internacional que la posiciona como la segunda más rápida del país (El Tiempo, 2023). Aunque no se

tiene proyectado a corto plazo la instalación de más cables, de acuerdo con los resultados del OMC:VAM, el área cuenta con 80 219.62 km² de zonas que cumplen con las condiciones físicas y ambientales para el tendido de nuevos cables submarinos, que corresponden al 48.32 % del archipiélago.

Además de identificar las actividades con mayor potencial de crecimiento en los escenarios propuestos por la Dimar, el OMC:VAM permite definir si se pueden desarrollar en un mismo espacio geográfico y establecer si el desarrollo de una afecta a la otra, teniendo en cuenta un análisis de colocación, que determina la compatibilidad/incompatibilidad entre ellas (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023). En las áreas insulares que por su ubicación geográfica tienen menos accesibilidad, servicios públicos limitados, poca seguridad alimentaria, entre otros, el desarrollo de actividades marítimas a gran escala puede generar costos elevados, lo cual puede limitar la inversión tanto del sector público como privado, afectando la calidad de vida de la población (André *et al.*, 2022; Gómez, 2022; Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", 2020). Por lo anterior, es importante una gestión adecuada de estos espacios, de tal manera que se pueda identificar cuáles usos/actividades pueden ser más eficientes y eficaces en una misma área (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023).

Para el archipiélago se identificó que los proyectos de acuicultura no se pueden desarrollar con cables submarinos ni con parques eólicos *offshore*, principalmente, por los daños accidentales que se pueden presentar (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023; Cardia *et al.*, 2017; Meindl, 1996; Queensland Government 2019; Rojo, 2016). Mientras que parques eólicos, al ser condicionalmente compatibles con cables submarinos, se podrían ejecutar bajo ciertos acuerdos entre las partes interesadas, ya que hay intereses comunes como la seguridad, el acceso y los procesos de instalación, mantenimiento y operaciones en el lecho marino; sin embargo, deben tenerse en cuenta sus restricciones (Afanador-Franco *et al.*, 2022, 2023; European Commission, s.f.; ESCA, 2016; ICPC, 2013). Adicionalmente, en caso de que se presenten solicitudes de estas tres actividades en una misma área, de acuerdo con el valor del IPTD propuesto por la Dimar, la acuicultura debería

priorizarse con respecto a las otras dos, por tener mayor tendencia de crecimiento y área adecuada para su funcionamiento (Afanador-Franco, Molina-Jiménez, Pusquín-Ospina, Barrientos, Banda-Lepesquer y Castro-Mercado, 2023).

Finalmente, el reto del OMC:VAM, al ser un proceso continuo y adaptable a las condiciones de los espacios marino-costeros, es incluir el cambio climático en los escenarios de desarrollo futuro al año 2050 en el territorio nacional, reconociendo su importancia y efectos en la planificación de las actividades marítimas y los recursos naturales (Cepal, 2019).

CONCLUSIONES

El OMC:VAM es una contribución de la Dimar para la gestión de las actividades marino-costeras que se desarrollan en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, ya que se analizaron sus condiciones actuales y futuras, evidenciando conflictos, compatibilidades y zonas adecuadas para el establecimiento de nuevas actividades.

En el área del archipiélago, en la matriz cruzada de compensación por parejas se analizaron en total 1 444 cruces entre los 38 usos/actividades identificadas, de los cuales 288 corresponden a zonas en donde hay superposición con conflictos, 180 son zonas de superposición de usos, pero sin conflicto, y 976 casos en los que no existe superposición entre usos/actividades.

Asimismo, mediante la zonificación por índice de conflicto se establecieron las áreas con niveles altos, medios y bajos de conflictos, dependiendo de los pesos asignados desde la matriz normalizada de compensación por parejas. Indicando que los usos/actividades marítimas con mayor índice de conflicto corresponden a áreas restringidas, área marina protegida, zona de pesca artesanal, playas con vocación turística y corales

Las actividades marítimas con más conflictos identificados a partir de las superposiciones para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina corresponden a zona de pesca artesanal, áreas restringidas, área marina protegida, pastos marinos y corales.

La aplicación de la metodología MAYC se llevó a cabo en las zonas libres de usos/actividades, las

cuales representan el 61.24 % del área de estudio, identificando las zonas aptas para acuicultura (61.24 %), parques eólicos (48.02 %) y cables submarinos (48.32 %).

El modelo de Colocalización permitió establecer que en las zonas donde se superponen los usos/actividades de acuicultura vs. parques eólicos o cables submarinos, solo se puede desarrollar uno de los dos. Adicionalmente, en los casos en que se presenten propuestas de cables submarinos con parques eólicos y se superpongan, las partes interesadas deben llegar a acuerdos para ejecutar sus proyectos con el mínimo de conflictos.

El IPTD en los dos escenarios de desarrollo futuro para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina sugiere que se debe priorizar el uso de acuicultura respecto a parques eólicos y cables submarinos, debido a que tiene una mayor tendencia de crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Dimar por el apoyo y financiación de la presente investigación, enmarcada dentro del programa 'Gestión de los litorales colombianos' del proyecto 'Planificación y ordenamiento de los litorales y áreas marinas colombianas'.

BIBLIOGRAFÍA

- Afanador-Franco, F.; Molina-Jiménez, M. P.; Pusquín-Ospina, L.T.; Escobar-Olaya, G. A.; Castro-Mercado, I. F. (2019). Conflictos de uso en el Proceso de Ordenamiento Marino Costero: Visión de Autoridad Marítima. Departamento de Bolívar – Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 38(1), 27-40. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.507>
- Afanador-Franco, F.; Molina-Jiménez, M. P.; Pusquín-Ospina, L. T.; Guevara-Cañas, N.; González-Bustillo, M. J.; Martínez-Uparela, K. I.; Banda-Lepesquer, C.; Escobar-Olaya, G. A.; Castro-Mercado, I. F. (2021). Coastal Marine Planning: Vision of the Maritime Authority. Case of the Department of Bolívar-Colombia. *Revista Costas*, 2, 137-164. <https://doi.org/10.26359/costas.e0721>
- Afanador-Franco, F.; Molina-Jiménez, M. P.; Pusquín-Ospina, L. T.; González-Bustillo,

- M. J.; Banda-Lepesquer, C.; Berrío-Reyes, Y.; Escobar-Olaya, G. A.; Castro-Mercado, I. F. (2022). Modelo de asignación y colocalización de actividades marítimas para el ordenamiento marino costero en el departamento de Bolívar, Colombia. Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 41(2), 29-57. <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.600>
- Afanador-Franco, F.; Molina-Jiménez, M. P.; Pusquín-Ospina, L. T.; Barrientos, N. S.; Banda-Lepesquer, C.; Castro-Mercado, I. F. (2023). Zonificación de actividades marítimas bajo escenarios de desarrollo futuro en los departamentos de Bolívar, Sucre y Córdoba, Colombia. *Marine and Fishery Sciences (MAFIS)*, 36(3), 289-322. <https://doi.org/10.47193/mafis.3632023010908>
- Aguilera-Díaz, M. (2016). *Geografía económica del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Banco de la República. <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-133.pdf>
- Aldana, O.; Hernández, A. (2016). *La planificación espacial marina: marco operativo para conservar la diversidad biológica marina y promover el uso sostenible del potencial económico de los recursos marinos en el Caribe*. Instituto de Oceanología. https://cyted.org/assets/img/publicacao/4/2016.2._planificacion_espacial_marina_aldana_y_hernandez-zanuy_2016.pdf
- Almazán, J.; Palomino, M.; García, J. (2000). *Instalaciones off-shore para carga y descarga de hidrocarburos. Monoboyas y campos de boyas*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://www.almazan-ingenieros.es/data/archivo/Instalaciones%20off-shore%20para%20carga%20y%20descarga%20de%20hidrocarburos.%20Monoboyas%20y%20campos%20de%20boyas.pdf>
- Álvarez, R. (2017). Cable Submarino, Conexión DWDM entre continentes. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica de Madrid.
- André, L. V.; Van Wynsberge, S.; Chinain, M.; Gatti, C. M. I.; Liao, V.; Andréfouët, S. (2022). Spatial solutions and their impacts when reshuffling coastal management priorities in small islands with limited diversification opportunities. *Sustainability*, 14(7), 3871. <https://doi.org/10.3390/su14073871>
- Andrzejewicz, E.; Napierska, D.; Otremba, Z. (2002). The environmental effects of installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: a case study of the Polish Marine Area of the Baltic Sea. *Journal of Sea Research*, 49, 337-345. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(03\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(03)00020-0)
- Arias, C.; Duffis, K. (2017). *Sistema eléctrico insular con penetración de energías no convencionales: San Andrés*. Manglar. Uninorte. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/7763>
- Asociación Colombiana de Viajes y Turismo. (2023). *Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina deslumbrará en la 42 vitrina turística de Anato 2023*. Anato. ORG. <https://anato.org/noticias/archipelago-de-san-andres-providencia-y-santa-catalina-deslumbrara-en-la-42-vitrina-turistica-de-anato>
- Asomovil. (2021). *Avances de la conectividad en San Andrés y Providencia*. <https://www.asomovil.org/avances-de-la-conectividad-en-san-andres-y-providencia/>
- Baban, S. M.; Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable Energy*, 24(1), 59-71. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00169-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00169-5)
- Ban, N. C.; Hansen, G. J.; Jones, M.; Vincent, A. C. (2009). Systematic marine conservation planning in data-poor regions: socioeconomic data is essential. *Marine Policy*, 33(5), 794-800. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2009.02.011>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). *Hacia la sostenibilidad eléctrica en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia: análisis de alternativas*. BID. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hacia-la-sostenibilidad-el%C3%A9ctrica-en-el-Archipi%C3%A9lago-de-San-Andr%C3%A9s-Providencia-y-Santa-Catalina-Colombia-An%C3%A1lisis-de-alternativas.pdf>
- Boehlert, G.; Gill, A. (2010). Environmental and Ecological Effects of Ocean Renewable Energy Development-A Current Synthesis. *Oceanography*, 23(2), 68-81. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.46>

- Boyd, C. E. (1995). Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1785-6>
- Cardia, F.; Ciattaglia, A.; Corner, R. A. (2017). *Guidelines and criteria on technical and environmental aspects of cage aquaculture site selection in the Kingdom of Saudi Arabia*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/1616/i6719e.pdf?sequence=1&isAllowed=y1>
- Carroll, M. L.; Cochrane, S.; Fieler, R.; Velvin, R.; White, P. (2003). Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture*, 226(1-4), 165-180. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00475-7)
- Carter, L.; Burnett, D.; Drew, S.; Marle, G.; Hagadorn, L.; Bartlett-McNeil, D.; Irvine, N. (2009). Submarine Cables and the Oceans-Connecting the World. UNEP-WCMC. *Biodiversity Series* N°. 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC. https://www.researchgate.net/publication/286143047_Submarine_cables_and_the_oceans_Connecting_the_world
- Carvajal, A. (2009). Caracterización físico-biótica del litoral del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. En: Dirección General Marítima (Ed.), *Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano*. (Tomo I, Vol. 1).
- Cavia del Olmo, B. (2009). *Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores*. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. <http://hdl.handle.net/2099.1/8720>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (2010). *Reporte Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano-San Andrés y Providencia*. CIOH.
- Christie, N.; Smyth, K.; Barnes, R.; Elliott, M. (2014). Co-location of activities and designations: ¿A means of solving or creating problems in marine spatial planning? *Marine Policy*. 43, 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.06.002>
- Comisión Colombiana del Océano. (s. f.). *Reserva de biósfera Seaflower Departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia*. <http://cco.gov.co/cco/publicaciones/83-publicaciones/261-mapa-reserva-de-biósfera-seaflower.html>
- Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Aportes al conocimiento de la reserva de biósfera Seaflower. Comisión Colombiana del Océano*. CCO.
- Comisión Colombiana del Océano. (2018). *Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros (Pnoec)*. CCO.
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2020). *Documento de Consulta Observatorio de Inversión en Telecomunicaciones de la CRC*. https://cocom.gov.co/system/files/Proyectos%20Comentarios/2000-38-2-1/Propuestas/200428_dto_observatorio_de_inversion.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2019). *Planificación para el desarrollo territorial sostenible en América Latina y el Caribe* (LC/CRP.17/3). Cepal. <https://repositorio.cepal.org/bitstreams/382c3038-a88d-4f29-aaf7-5c08bb1b2faf/download>
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2018). *Actualización Plan de Manejo Ambiental del Parque Natural Regional "JOHNNY CAY REGIONAL PARK" 2019-2023*. Coralina. <https://runapadmin.parquesnacionales.gov.co/default/general/descargarplan?pid=458>
- COWI; Ernst Young. (2013). *Study to support Impact Assessment of Marine Knowledge 2020*. https://maritime-forum.ec.europa.eu/document/download/c3da0e84-47e3-4823-b50a-500790dd0c72_en?filename=Marine%20Knowledge%20IA%20Study_Final%20report_03.04.13.pdf
- Dagua, C.; Torres, R.; Monroy, J. (2018). Condiciones oceanográficas de la reserva de biósfera Seaflower 2014-2016. *Bol. Cient. CIOH* (37):53-74. <https://doi.org/10.26640/22159045.449>

- De Groot, R.; Wilson, M.; Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 41, 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Decreto Ley N°. 2324 de 1984. (18 de septiembre). *Por el cual se reorganiza la Dirección General Marítima y Portuaria*. Ministerio de Defensa Nacional.
- Decreto N°. 5057 de 2009. (30 de diciembre). *Por el cual se modifica parcialmente la estructura del Ministerio de Defensa Nacional-Dirección General Marítima y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Defensa Nacional.
- Decreto N°. 1946 de 2013. (09 de septiembre). *Por medio del cual se reglamentan los artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° y 9° de la Ley 10 de 1978, y 2° y 3° de la Ley 47 de 1993 en lo concerniente al mar territorial, la zona contigua, algunos aspectos de la plataforma continental de los territorios insulares colombianos en el mar Caribe occidental y a la integridad del departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Presidencia de la República de Colombia.
- Decreto N°. 2668 de 2012. (21 de diciembre). *Por el cual se reglamentan los artículos 36 a 38 de la Ley 915 de 2004, por la cual se dictó el Estatuto Fronterizo para el Desarrollo Económico y Social del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Departamento Nacional de Planeación. (2020a). *Documento Consejo Nacional de Política Económica y Social. Conpes 3990*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3990.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020b). *Política General de Ordenamiento Territorial (PGOT)*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3990.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022 - 2026*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf>
- Díaz, J. M. (2005). Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29, 357-369. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00038/full> [https://doi.org/10.18257/raccefyn.29\(112\).2005.2170](https://doi.org/10.18257/raccefyn.29(112).2005.2170)
- Díaz-Romero, T.; Domínguez-Tejo, E.; Schill, S. (2012). Zonificación Basada en Ecosistemas en la Bahía de Samaná, República Dominicana. *Proceedings of the 65th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 65.128-135. https://www.researchgate.net/publication/275949153_Zonificacion_Basada_en_Ecosistemas_en_la_Bahia_de_Samana_Republica_Dominicana
- Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (2013). *Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano*. Dimar-CIOH. Dirección General Marítima.
- Dirección General Marítima de Colombia. (2022). *Plan Estratégico de Desarrollo 2042*. https://cecoldodigital.dimar.mil.co//3422/1/420_DIMAR.pdf
- Echeberría, R. (2020). *Infraestructura de Internet en América Latina: puntos de intercambio de tráfico, redes de distribución de contenido, cables submarinos y centros de datos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal).
- Ehler, C. (2021). Two decades of progress in Marine Spatial Planning. *Marine Policy*. 132. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104134>
- Ehler, C. N.; Douvère, F. (2009). *Marine Spatial Planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management*. UNESCO. <https://doi.org/10.25607/obp-43>
- El Tiempo. (2023, 15 de septiembre). San Andrés tiene el segundo Internet más rápido de Colombia. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/mas-contenido/san-andres-segundo-departamento-con-mejor-velocidad-de-descarga-de-internet-809234>

- ESSO. (2008). *Offshore impact assessment*. PNG LNG Project. https://pnglng.com/media/PNG-LNG-Media/Files/Environment/EIS/eis_appendix11.pdf.
- Esteban, M. D. (2009). *Propuesta de una metodología para la implantación de parques eólicos offshore*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- European Commission. (s. f.). *Conflict fiche 2: Cables / pipelines and commercial fisheries / shipping*. European MSP Platform. https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/sites/default/files/2_cables_fisheries-revised_0.pdf
- European Subsea Cables Association. (2016). *Guideline N°. 6 – The Proximity of Offshore Renewable Energy Installations and Submarine Cable Infrastructures*. ECSA. <https://www.escaeu.org/download/?Id=123>
- Flower, J.; Ramdeen, R.; Estep, A.; Thomas, L. R.; Francis, S.; Goldberg, G. ... y Lester, S. E. (2019). Marine spatial planning on the Caribbean Island of Montserrat: Lessons for data-limited small islands. *Conservation Science and Practice*: 2(4), e158. <https://doi.org/10.1111/csp2.158>
- Fugro Marine GeoServices, Inc. (2017). *Geophysical and Geotechnical Investigation Methodology Assessment for Siting Renewable Energy Facilities on the Atlantic OCS*. US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs, Herndon. OCS Study BOEM 2017- 049. <https://www.boem.gov/sites/default/files/environmental-stewardship/Environmental-Studies/Renewable-Energy/G-and-G-Methodology-Renewable-Energy-Facilities-on-the-Atlantic-OCS.pdf>
- Gallego-Cosme, M. (2014). La planificación y gestión territorial integral en islas pequeñas como herramienta de reducción de riesgos naturales. *Revista ABRA*, 34(48), 1-18. <http://dx.doi.org/10.15359/abra.34-48.1>
- Geister, J.; Díaz, J. (2007). *Ambientes Arrecifales y Geología de un Archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Mar Caribe, Colombia) con guía campo*. Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).
- Global Wind Energy Council. (2019). *Global wind report 2019*. GWEC. https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report_2019_digital_final_2r.pdf
- Global Wind Energy Council. (2021). *Global wind report 2021*. GWEC. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- Gobernación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (s. f.). *Plan Departamental de gestión del riesgo, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/383/PDGR%20San%20Andres.pdf>
- Gobernación del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2019). *Anuario Estadístico 2018*. <https://www.sanandres.gov.co/index.php/gestion/planeacion/plan-de-desarrollo/estadisticas/10909-anuario-estadistico-2018/file>
- Gobernación del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2020). *Plan de Desarrollo Departamental 2020-2023*. <https://sanandres.gov.co/index.php/gestion/planeacion/plan-de-desarrollo/plan-de-desarrollo-anuales/11524-plan-de-desarrollo-todos-por-un-nuevo-comienzo-2020-2023/file>
- Gobernación Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. (2021). *Anuario Estadístico 2021*. <https://www.sanandres.gov.co/index.php/gestion/planeacion/publicaciones/16599-anuario-estadistico-2021/file>
- Gómez, O. (2022). *Sustitución actual de generación de energía eléctrica a base de diesel a partir de FNCE para San Andrés islas*: Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Javeriana.
- González, J. (2007). *El potencial energético útil de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales.
- Greenhill, L.; Pro, S. (2018). *Workshop Report Maritime Spatial Planning for Islands: Las Palmas de Gran Canaria – Spain*. <https://>

- maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/sites/default/files/20181101_msp_for_islands_report.pdf.
- Grueso-López, N. (2022). *Anteproyecto de un Parque Eólico en la isla de San Andrés, Colombia financiado parcialmente por la comunidad local*. Tesis de maestría. Universidad de Barcelona.
- Guande, L.; Yancong, L.; Peng, Y.; Chengkai, L.; Xiaoli, M.; Yang, Q. (2013). Impacts of ocean current and seabed friction on the picking-up and laying-down processes of oil and gas pipelines. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1), 119-125. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(13\)60013-0](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(13)60013-0)
- Handy, R. D.; Poxton, M. G. (1993). Nitrogen pollution in mariculture: toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. *Rev. Fish Biol. Fish.* 3, 205-241. <https://doi.org/10.1007/BF00043929>
- Hardman, E. Thomas, H. L. Baum, D. Clingham, E. Hobbs, R. Stamford, T. ... y Smith, N. (2022). Integrated marine management in the United Kingdom overseas territories. *Frontiers in Marine Science*, 8, 643729. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.643729>
- Herbeck, L. S.; Unger, D.; Wu, Y.; Jennerjahn, T. C. (2013). Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fishponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China. *Continental Shelf Research*, 57, 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.05.006>
- Hortúa, N. (2013). *Zonificación de la Acuicultura Nacional*. <https://www.aunap.gov.co/documentos/OGCI/Zonificaci%C3%B3n-de-la-Acuicultura-en-Colombia.pdf>
- Idárraga-García, J.; León-Rincón, H. A. (2019). Unraveling the Underwater Morphological Features of Roncador Bank, Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (Colombian Caribbean). *Front. Mar. Sci.* 6:77. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00077>.
- Idárraga-García, J.; García-Varón, J.; León-Rincón, H. A. (2021). Submarine geomorphology, tectonic features and mass wasting processes in the archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina (western Caribbean). *Marine Geology*, 435. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106458>
- Inger, R.; Attrill, M. J.; Bearhop, S.; Broderick, A. C.; James Grecian, W., Hodgson, D. J.; ...; Godley, B. J. (2009). Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *Journal of applied ecology*, 46(6), 1145-1153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01697.x>
- International Cable Protection Committee. (2013). *ICPC Recommendation N°. 13: The Proximity of Offshore Renewable Wind Energy Installations and Submarine Cable Infrastructure in National Waters*. ICPC. https://downloads.regulations.gov/BOEM-2022-0009-0193/attachment_1.pdf
- Ivars, A. (2017). *Diseño de una jaula flotante para el engorde del pescado en el golfo de Cádiz*. <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/19146/911351.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jumeau, R. (2013). *Small island developing states, large ocean states*. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1772Ambassador%20Jumeau_EGM%20Oceans%20FINAL.pdf.
- Kapetsky, J. M.; Aguilar, J.; Jenness, J. (2013). *A global assessment of offshore mariculture potential from a spatial perspective*. FAO fisheries and aquaculture technical paper, (549), I. <https://www.fao.org/4/i3100e/i3100e.pdf>
- López, J.; Ruiz, W. (2015). *Manual de construcción y manejo de jaulas flotantes para la maricultura del Ecuador*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2664.2647>.
- Loughney, S.; Wang, J.; Bashir, M.; Armin, M.; Yang, Y. (2021). *Development and application of a multiple-attribute decision-analysis methodology for site selection of floating offshore wind farms on the UK Continental Shelf*. Sustainable Energy Technologies and Assessments. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101440>
- Maguire, B.; Potts, J.; Fletcher, S. (2012). The role of stakeholders in the marine planning process—Stakeholder analysis within the Solent, United

- Kingdom. *Marine Policy*, 36(1), 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2011.05.012>
- Mahadeo, S. (2022). Marine spatial planning in the Eastern Caribbean: Trends and progress. *Marine Policy*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105277>.
- Malhotra, S. (2010). Design and construction considerations for offshore wind turbine foundations in North America. In: *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. [https://doi.org/10.1061/41095\(365\)155](https://doi.org/10.1061/41095(365)155)
- Mariyasu, L.; Allain, R.; Benhalima, K.; Claytor, R. (2004). *Effects of seismic and marine noise on invertebrates: A literature review*. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/317113.pdf>
- Martínez, P. (2017). Cable submarino de San Andrés: hacia dónde va la inversión pública en infraestructura. *CITAS*, 3(1), 73-87. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8662975.pdf>. <https://doi.org/10.15332/24224529.5149>
- Más Comunidad. (2023, 23 de marzo). *Las Islas del Caribe colombiano migran hacia las energías renovables*. + Comunidad. <https://mascomunidad.org.ar/las-islas-del-caribe-migran-hacia-las-energias-renovables/>.
- Matiz-Chicacausa, A.; González-Quintero, A.; Gallardo-Gómez, A.; Usseglio-Lizcano, A.; Herrera-Rodríguez, D.; Álvarez-González, E.; ... ; Rodríguez, J. M. (2016). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina 2012-2027*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/33518>
- McGowan, L.; Jay, S. J.; Kidd, S. (2019). Scenario-Building for Marine Spatial Planning. En Zaucha, J. y Gee, K. (Eds.), *Maritime Spatial Planning: past, present, future* (pp. 327-351). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98696-8_14.
- Mead, L. (2021). Small islands, large oceans: voices on the frontlines of climate change. *Earth Negotiations Bulletin*. <https://www.iisd.org/system/files/2021-03/still-one-earth-SIDS.pdf>
- Meindl, A. (1996). *Guide to moored buoys and other ocean data acquisition systems*. <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/81/DBCP-08-Guide-Moored-Buoys.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Merino, M. C.; Bonilla, S. P.; Bages, F. (2013). *Diagnóstico del estado de la acuicultura en Colombia*. <https://www.aunap.gov.co/documentos/OGCI/25-Diagn%C3%B3stico-del-estado-de-la-acuicultura-en-Colombia.pdf>.
- Milne, P. H. (1976). Engineering and the Economics of Aquaculture. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 33(4), 888-898. <https://doi.org/10.1139/f76-113>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2020). *Plan San Andrés conectado: el futuro digital es de todos*. (MinTIC). https://mintic.gov.co/portal/715/articles-126014_recurso_4.pdf
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2007). *Stellwagen Bank National Marine Sanctuary Report 2007*. NOAA. <http://sanctuaries.noaa.gov/science/condition/sbnms/welcome.html>.
- Newcombe, C. P.; McDonald, D. D. (1991) Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management*, 11, 72-82. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1991\)011<0072:EOS SOA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1991)011<0072:EOS SOA>2.3.CO;2)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *El estado actual de la pesca y la acuicultura*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/070dc908-7b4e-4b25-94a8-204cdf2cb08/download>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016: contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos*. FAO. <https://www.fao.org/3/i5555s/i5555s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020: la sostenibilidad en acción*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca9229es/ca9229es.pdf>.
- Ortiz-Royero, J. (2012). Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andrés

- Island, to tropical storms and hurricanes, 1900-2010. *Nat. Hazards*, 61, 815-827. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0069-1>
- Ortiz-Royero, J.; Plazas, M.; Lizano, O. (2015). Evaluation of extreme waves associated with cyclonic activity on San Andres Island in the Caribbean Sea since 1900. *Journal of Coastal Research*, 31(3), 557-568. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00072.1>.
- OSPAR. (2009). Assessment of the Environmental Impacts of Cables. Convención para la protección del medio ambiente del Atlántico del Nordeste. *Biodiversity series*, (437), 3-18. https://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00437_Cables.pdf
- Palomino, M.; Almazán, J. L.; Arrayás, J. L. (2001). *Oscilaciones en masas de agua confinadas: resonancia en puertos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. <https://www.almazan-ingenieros.es/data/archivo/Oscilaciones%20en%20masas%20de%20agua%20confinadas.%20Resonancia%20en%20puertos..pdf>
- Pérez, M.; García, T.; Invers, O.; Ruiz, J. M. (2008). Physiological responses of the seagrass *Posidonia oceanica* as indicators of fish farm impact. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 869-879. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.02.001>. PMID:18334257
- Pinilla, G.; Gutiérrez, A.; Ulloa-Delgado, G. (2007). *Efectos ecológicos de la derivación de aguas y sedimentos hacia la bahía de Barbacoas*. http://www.bdigital.unal.edu.co/3490/1/Estudio_Ecol%C3%B3gico_de_la_derivaci%C3%B3n_de_aguas_y_sedimentos_del_Canal_del_Dique_hacia_la_bah%C3%ADa_de_Barbacoas.pdf.
- Pomeroy, R. S.; Baldwin, K.; Mc. Conney, P. (2014). Marine spatial planning in Asia and the Caribbean: application and implications for fisheries and marine resource management. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 32, 151-164. <https://doi.org/10.5380/dma.v32i0.35627>.
- Portman, M. E. (2016). Environmental Planning for Oceans and Coasts: *Methods, Tools and Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26971-9>
- Prado, I. D. (2018). Estudio de implantación de un parque eólico *offshore* flotante en la costa de Cantabria. Tesis de grado. Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13336/IPG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pratt, S. (2015). The economic impact of tourism in SIDS. *Annals of Tourism Research*, 52, 148-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.annals.2015.03.005>.
- Programa Ambiental del Caribe. (2019). *La gestión basada en los ecosistemas y la aplicación de un sistema de apoyo a las decisiones en el Gran Caribe: lecciones aprendidas desde el concepto hasta la acción*. <https://gefcrew.org/carrcu/SPAWSTAC9/Info-Docs/WG.42.INF.13.ES.pdf>
- Queensland Government. (2019). *Anchorage area design and management guideline: Maritime safety Queensland*. <https://www.msq.qld.gov.au/-/media/TMROnline/msqinternet/MSQFiles/Home/About-us/Right-to-information/Published-information/anchorage-area-design-and-management-guideline.pdf?la>
- Rabasso, M. K. (2016). *Los impactos ambientales de la acuicultura, causas y efectos*. Instituto Canario de Ciencias Marinas. https://acedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/6671/1/0231633_00028_0007.pdf
- Ramírez-Charry, E. (2019). *Territorialidades en la isla de San Andrés. Hegemonías y luchas por el territorio*. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76599/EdwinJairRamirezCharry.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Research and Markets. (2020). *Submarine Communication Cables Market - By Cable Type, By Service: Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis and Forecast, 2020-2026*. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5143812/submarine-communication-cables-market-by-cable>.
- Research and Markets. (2022). *Submarine Cable Systems Market by Application (Communication Cable and Power Cable), Component (Dry Plant*

- Products and Wet Plant Products) Offering, Voltage, Type (Single Core and Multicore), insulation, End User and Geography - Global Forecast to 2026.* <https://www.researchandmarkets.com/reports/4995509/submarine-cable-systems-market-by-application#rela3-5393215>.
- Resolución N°. 40284 del 2022. (3 de agosto). *Por medio de la cual se define el proceso competitivo para el otorgamiento del permiso de Ocupación Temporal sobre áreas marítimas, con destino al desarrollo de proyectos de generación de energía eólica costa afuera, se convoca la primera ronda y se dictan otras disposiciones.* Ministerio de Minas y Energía y El Director General Marítimo. <https://www.minenergia.gov.co/documents/8462/res-40284-2022.pdf>
- Rey, W.; Monroy, J.; Quintero-Ibáñez, J.; Escobar-Olaya, G. A.; Salles, P.; Ruiz-Salcines, P.; Appendini, C. (2019). Evaluación de áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta generada por huracanes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Boletín Científico CIOH*, 38(2),57-68. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.465>.
- Rey, W.; Ruiz-Salcines, P.; Salles, P.; Urbano-Latorre, C.; Escobar-Olaya, G. A.; Osorio, A.; Ramírez, J.; Cabarcas-Mier, A.; Jigena-Antelo, B.; Appendini, C. M. (2021). Hurricane Flood Hazard Assessment for the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, Colombia. *Front. Mar. Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.766258>.
- Rojo, S. (2016). *El arte de fondear: análisis de movimientos, capacidad de agarre y condiciones para garrear de un ancla fondeada.* Objetivos del "Plan de Fondeo" y Estudio de Viabilidad del Método de Fondeo "U-turn". Prácticos de Puerto. https://www.practicosdepuerto.es/sites/default/files/articulo_el-arte-de-fondear.pdf
- Rubino, M. (2008). *Offshore aquaculture in the United States: economic considerations, implications & opportunities.* NOAA Technical Memorandum NMFS F/SPO-103, 263. <https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/tm103.pdf>
- Sánchez. (2012). *Manejo ambiental en Seaflower, reserva de biósfera en el Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina.* Banco de la República. https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_176.pdf.
- Sarmiento-Guerrero, S.; Pérez-Walteros, N. (2021). Impacto de la acuicultura en restaurantes y en la gastronomía de San Andrés-Colombia. *Punto de vista*, 12(19), 126-135. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9020158.pdf> <https://doi.org/10.15765/pdv.v12i19.3282>
- Scenari Introduction. (2021). *Introduction.* Meriskenaariot. <https://meriskenaariot.info/merialuesuunnitelma/en/scenario-introduction>.
- Servicio Nacional de Aprendizaje. (2013). *Aprendices llevan energía eólica a San Andrés.* SENA. <https://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=2684>.
- Sesma, E. E. (2020). *Análisis de la viabilidad de la instalación de un parque eólico offshore flotante en España.* https://oa.upm.es/62993/1/TFG_ELENA_ERVITI_SESMA.pdf
- Stigebrandt, A. (2011). Carrying capacity: general principles of model construction. *Aquaculture Research*, 42, 4-50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02674.x>
- Sujadmi y Murtasidin, B. (2020). Major Challenges in Developing Marine Spatial Planning in Bangka Belitung Island Province. *J. Phys.: Conf. Ser*, 1655. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012139>.
- Taormina, B.; Bald, J.; Want, A.; Thouzeau, G.; Lejart, M.; Desroy, N.; Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96,380-391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>
- TeleGeography. (2022). *Submarine Cable Map.* <https://www.submarinecablemap.com/>.
- The Nature Conservancy. (2012). *St. Vincent y The Grenadines.* Marineplanning. <https://marineplanning.org/projects/caribbean/st-vincent-the-grenadines/>.

- Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central*. <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf>
- Usón, F. (2014). *Desarrollo de un modelo de costes para parques eólicos offshore*. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Vagiona, D. G.; Kamilakis, M. (2018). Sustainable site selection for offshore wind farms in the South Aegean-Greece. *Sustainability*, 10(3), 749. <https://doi.org/10.3390/su10030749>
- Vaselli, S.; Bertocci, I.; Maggi, E.; Benedetti-Cecchi, L. (2008). Effects of mean intensity and temporal variance of sediment scouring events on assemblages of rocky shores. *Marine Ecology Progress Series*, 364:57-66. <https://doi.org/10.3354/meps07469>
- Wilhelmsson, D.; Malm, T.; Thompson, R.; Tchou, J.; Sarantakos, G.; McCormick, N.; Luitjens, S.; Gullström, M.; Paerson Edwards, J. K.; Amir, O.; Dubi, A. (Eds.) (2010). *Greening Blue Energy- Identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of offshore renewable energy*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2010-014.pdf>
- Worzyk, T. (2009). *Submarine Power Cables*. Power Systems. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01270-9>.
- Xu, Y.; Li, Y.; Zheng, L.; Cui, L.; Li, S.; Li, W.; Cai, Y. (2020). *Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision-making method in Wafangdian, China*. *Energy*, 207, 118222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118222>