

*Boletín*

EXPEDICIÓN CIENTÍFICA PACÍFICO 2021-I

# BOCAS DE SANQUIÁNGA



Gobierno de  
Colombia



COMISIÓN  
COLOMBIANA  
DEL OCEANO

**Boletín**

**EXPEDICIÓN CIENTÍFICA PACÍFICO 2021-I**

# BOCAS DE SANQUIÁNGA



Gobierno de  
Colombia



Ciencias



COMISIÓN  
COLOMBIANA  
DEL OCEANO



ARMADA  
DE COLOMBIA



Ministerio de Defensa Nacional  
**Dirección General Marítima**  
Autoridad Marítima Colombiana



PARQUES NACIONALES  
NATURALES DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

**Boletín** EXPEDICIÓN CIENTÍFICA PACÍFICO 2021-I

# BOCAS DE SANQUIÁNGA

## COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCÉANO

Laura Camila Sarabia Torres  
**Presidente**

CN Juan Camilo Forero Hauzeur  
**Secretario Ejecutivo**

TN Sebastián Reyes  
**Jefe Asuntos Marinos y Costeros**

Damián S. Pardo  
**Asesor Ecosistemas Estratégicos del Pacífico**

Catalina Sánchez Posada  
**Asesora Ecosistemas Estratégicos del Pacífico**

Laura Ñustes  
**Asistente Ecosistemas Estratégicos del Pacífico**

Angie Grimaldos  
**Asesora Administrativa**

## UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

John Josephraj Selvaraj  
**Profesor Asociado Sede Palmira**

Mauricio Goldman  
**Profesional Instituto de Estudios del Pacífico Sede de Presencia Nacional de Tumáco**

## DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA

VA John Fabio Giraldo Gallo (2024)  
**Director general marítimo**

VA Juan Francisco Herrera Leal (2021)  
**Director General Marítimo**

CF Alejandro Sanín Acevedo (2021)  
**Comandante ARC Providencia**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS DEL PACÍFICO-CCCP**

CF Natalia Otálora (2021)  
**Directora CCCP**

CC Sergio Barájas (2021)  
**Jefe de Crucero**

**PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA**

Gustavo Mayor  
**Jefe del área PNN Sanquianga**

Leidy Cifuentes  
**Profesional del área PNN Sanquianga**

Luciano Montaña  
**Coordinador Equipo Mixto PNN Sanquianga**

## MESA TÉCNICA INTERSECTORIAL

Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos - Minambiente

Dirección General Marítima

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico

Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca

Dirección Territorial Pacífico Parques Nacionales Naturales de Colombia

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés

Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico

## MESA DE ARTICULACIÓN TERRITORIAL

Consejo Comunitario de la Comunidad Negra del Río Sanquianga

Consejo Comunitario de la Comunidad Negra Punta Mulatos

Consejo Comunitario de la Comunidad Negra de Bajo Tapaje

Consejo Comunitario de la Comunidad Negra ODEMAP

## AUTORES

### Dirección General Marítima

Kevin Henao López  
Paola Echeverry Hernández  
Stephany Montoya Sáchica

**Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico**

Brainer Ángel  
Christian Bermúdez-Rivas  
Fredy Castrillón  
Humberto Quintana  
Jenny Parada  
Jesús Reyes  
Yadi Moreno

### Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Carlos Andrés Franco Prieto  
Diana Salazar Velandia  
Mónica González  
Nelson Nieto  
Pedro Karin Serrato

### Universidad Nacional de Colombia

Augusto R. Acosta Peña  
Esteban Betancourt

### Universidad del Valle

Alan Giraldo  
Juan José Gallego Zerrato  
Julio César Herrera Carmona

### Parques Nacionales Naturales

Andrés Cuéllar Chacón  
Rodrigo Lozano Osorio

### Florida International University

Diego Cardeñosa

**NOVA Southeastern University / Fundación Colombia Azul**

María Alejandra Herrera

## WWF Colombia

Elisa Casella  
Gustavo A. Castellanos-Galindo  
Luis Alonso Zapata Padilla  
Marc Simard

**Leibniz Centre for Tropical Marine Research**

Elisa Casella

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

Hector Tavera

**Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology**

Marc Simard

**SABEDORAS Y SABEDORES TRADICIONALES**

Juan Orobio Mindinero  
Bernardo Reina Salas  
Crucito Obando Cambindo  
Danilo Hurtado  
Felix Rodríguez Cuero  
Luciano Montaña Yesquen  
Emilio Estupiñan Estupiñan  
Francisco Reina Medina  
Brayan Alexis Ruíz Gamboa  
Enrique Ciriaco Vivero Segura

## COORDINACIÓN EDITORIAL

Damián S. Pardo  
**Coordinación Programa Pacífico**

Catalina Sánchez Posada  
**Coordinación Programa Pacífico**

## CITACIÓN

CCO. (2024). Boletín Expedición Científica Pacífico 2021-I Bocas de Sanquianga. Bogotá D.C.: Editorial Puntoaparte Editores.

**Puntoaparte**  
Editores

Andrés Barragán  
**Dirección editorial**

Juan Mikán  
**Corrección de Estilo**

Inti Alonso  
**Dirección de arte**

Valeria Cobo  
**Diseño y Diagramación**

Guillermo Torres  
David Sarmiento  
**Ilustración**

## ISSN

3028-4090

Comisión Colombiana del Océano  
Carrera 86 No. 51 - 66 Oficina 306 |  
Edificio World Business Center |  
www.cco.gov.co | Bogotá D.C., Colombia |  
Septiembre de 2024

“Boletín Expedición Científica Pacífico 2021-I Bocas de Sanquianga” es una publicación de carácter técnico e informativo. Su edición cuenta con el ISSN 3028-4090 para formato digital e impreso.

Este producto intelectual está protegido por el copyright © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta. Sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons.

# Contenido

Presentación

Pág. 8

---

Ciencia en territorios inexplorados: descubriendo los tesoros naturales de la subregión Sanquianga-Gorgona

Pág. 10

---



Código de barras genético y riqueza taxonómica de la herpetofauna

Pág. 14

---



Diversidad y abundancia relativa de elasmobranquios

Pág. 18

---



Creación de un sistema de información geográfica integrada y sus herramientas geomáticas asociadas como aporte a la conservación y desarrollo sostenible de los servicios ecosistémicos

Pág. 22

---



Presencia de *Vibrio* spp. en la subregión Sanquianga-Gorgona y su relación con las condiciones hidrográficas

Pág. 26

---



Características estructurales de los bosques de manglar más altos del continente americano: una comparación de medidas en tierra, con drones y de radar

Pág. 34

---



Diversidad, abundancia y distribución del ictioplancton y su relación con las condiciones oceanográficas y los períodos mareales

Pág. 42

---



Análisis de la dinámica espacio-temporal del bosque de manglar

Pág. 50

---

Referencias

Pág. 56

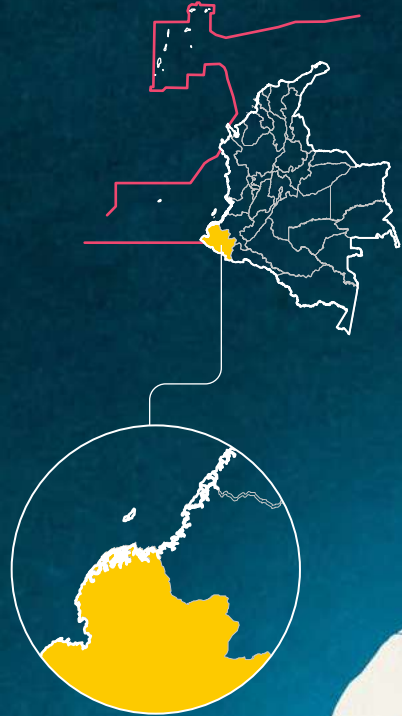
---

Expedición Científica

# Pacífico 2021-I

## Bocas de Sanquiánga






En este mapa cada punto representa una estación de muestreo para cada uno de los proyectos que se llevaron a cabo en el marco de la ECP 2021-I, los cuales se diferencian a su vez por colores.



### PNN GORGONA



### Nombre del proyecto

-  Código de barras genético y riqueza taxonómica de la herpetofauna
-  Diversidad y abundancia relativa de elasmobranquios
-  Presencia de *Vibrio* spp. en la subregión Sanquianga-Gorgona y su relación con las condiciones hidrográficas / Diversidad, abundancia y distribución del ictioplancton y su relación con las condiciones oceanográficas y los períodos mareales
-  Análisis de la dinámica espacio temporal del bosque de manglar
-  Parque Nacional Natural



Guapi

ISLA AJÍ

Timbiquí



# Presentación

Colombia es un país ampliamente reconocido en el mundo por su riqueza natural y cultural y 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.

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. En consecuencia, el país ha logrado grandes avances para abordar la gestión integral del territorio marítimo mediante la consolidación de diversas políticas públicas tales como la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares (PNAOCI), la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros (PNOEC) y, más recientemente, el CONPES 3990 «Colombia Potencia Bioceánica Sostenible 2030». También cabe destacar la formulación de los Intereses Marítimos Colombianos (IMC), un instrumento estratégico que sintetiza los ejes fundamentales de desarrollo de la nación para lograr «el océano que queremos», en consonancia con el Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

En virtud de lo anterior, 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. Para esto, el PNEC se fundamenta en la implementación de un modelo de cooperación intersectorial que permite articular las capacidades institucionales a partir del encuentro misional de los sectores de defensa, ambiente, productivo, academia, privado y civil, entre otros.

Es fundamental destacar que, gracias a un exhaustivo análisis, se ha logrado determinar que a través de los diversos proyectos de investigación llevados a cabo en el marco del PNEC, se ha generado información sumamente valiosa que contribuye al fortalecimiento de 10 de los 18 IMC. A su vez, este conocimiento tiene el potencial de aportar significativamente al logro del 52 % de las metas establecidas por la PNAOCI, así como al 28 % de las líneas de acción definidas por la PNOEC y el 24 % de las acciones definidas por el CONPES 3990.

Estas cifras, por supuesto, tienen la posibilidad de aumentar de manera proporcional a la ejecución de las expediciones. De igual forma, la consolidación del enfoque de coordinación territorial del PNEC 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. De esta forma se ha asegurado que estas comunidades se familiaricen y se beneficien de los proyectos de investigación llevados a cabo como herramientas para fortalecer sus procesos de gobernanza, gestión territorial y desarrollo socioeconómico.



Así las cosas, el presente boletín tiene como objetivo presentar de forma concisa los principales resultados de la **Expedición Científica Pacífico 2021-I Bocas de Sanquianga**. En este sentido, es menester reconocer el esfuerzo y el compromiso no solo de la CCO, sino de entidades como el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación a través de su programa «Colombia Bio», la Armada de Colombia, la Dirección General Marítima, Parques Nacionales Naturales de Colombia, la Universidad Nacional de Colombia, los consejos comunitarios de la Comunidad Negra del Equipo Mixto del Parque Nacional Natural Sanquianga y las diferentes instituciones de la CCO que conforman la Mesa Técnica Intersectorial del Programa Pacífico, quienes desde su profesionalismo y capacidades garantizaron el desarrollo exitoso de la expedición.

También es importante destacar el trabajo realizado por los **34 investigadores**, quienes consolidaron los resultados finales y permitieron conformar este interesante documento de divulgación científica que, con

el apoyo y decidido compromiso de la casa editorial Puntoaparte, permitirá la generación y difusión de nuevo conocimiento científico marino de nuestro país marítimo bioceánico.

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 bioceánica en beneficio de todos los colombianos.

Capitán de Navío Juan Camilo Forero Hauzeur  
**Secretario Ejecutivo de la Comisión Colombiana del Océano**

# Ciencia en territorios inexplorados: descubriendo los tesoros naturales de la subregión Sanquianga-Gorgona

En la macrocuenca del Pacífico se encuentra la subregión Sanquianga-Gorgona, en el departamento de Nariño, que resguarda una biodiversidad excepcional, una vasta riqueza de ecosistemas estratégicos y un patrimonio hídrico y cultural invaluable, especialmente de las comunidades negras e indígenas que la habitan. Este territorio desempeña un papel esencial en la protección de los recursos naturales del país y ofrece una oportunidad única para impulsar un desarrollo sostenible en el Pacífico colombiano, en armonía con la naturaleza y las tradiciones locales.

Con una extensión de 934 112,21 hectáreas, la subregión Sanquianga-Gorgona incluye dos importantes áreas protegidas: el Parque Nacional Natural (PNN) Sanquianga Territorio Ancestral y Colectivo, y el PNN Gorgona, junto con sus zonas adyacentes tanto terrestres como marinas. Estos ecosistemas son

fundamentales para la sostenibilidad de los recursos pesqueros y la provisión de servicios ambientales, beneficiando a más de 20 000 personas al garantizar su seguridad alimentaria y contribuir a la economía local. La biodiversidad y los recursos naturales que esta zona alberga son vitales no solo para las comunidades que dependen de ellos, sino también para el equilibrio ecológico de toda la región.

Una de las características más destacadas de la subregión es la presencia de amplias áreas de manglar, que constituyen el 53 % de los manglares del departamento de Nariño y el 20 % de los del Pacífico colombiano. Estos ecosistemas de manglar son esenciales para el mantenimiento de los recursos marinos al servir de hábitat para una gran variedad de especies y ser fundamentales para la sostenibilidad de la fauna marina. Además, los manglares cumplen una

función clave en la captura de dióxido de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, y actúan como barreras naturales que protegen a las comunidades costeras de la subida del nivel del mar, las tormentas, las inundaciones y los tsunamis. Su valor ecológico y económico los convierte en guardianes insustituibles del entorno marino y costero.

A pesar de la riqueza natural de Sanquianga-Gorgona, la región ha enfrentado profundas desigualdades socioeconómicas, la falta de oportunidades y la sobreexplotación de recursos. Además, el conflicto armado, las problemáticas de orden público y la presencia de grupos al margen de la ley han deteriorado el tejido social y afectado gravemente el desarrollo de la zona. Esto ha creado un escenario complejo donde los recursos naturales han sido explotados sin un adecuado control ni manejo, y el



Picúa  
*Leptodactylus* sp.

conocimiento científico de la región ha quedado rezagado con respecto a otras áreas del país. Por ello, la investigación científica en esta subregión es clave para establecer líneas base que permitan una gestión y manejo integral y sostenible de sus recursos, en beneficio de las comunidades locales y la conservación del territorio.

Es así como la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano (SECCO), junto con la Armada de Colombia, la Dirección General Marítima, Parques Nacionales Naturales, la sede Tumaco de la Universidad Nacional de Colombia y varias instituciones académicas y locales, zarpó desde San Andrés de Tumaco en el buque oceanográfico ARC Providencia para llevar a cabo la **Expedición Científica Pacífico 2021-I Bocas de Sanquianga** (ECP 2021-I). La entrega, la constancia y la responsabilidad de 17 instituciones nacionales e internacionales y de 6 consejos comunitarios de la comunidad negra (CCCN) permitieron desarrollar 9 proyectos en el área marino-costera, materializando así la expedición. Durante 21 días

de operación, 34 investigadores recolectaron información de registros biológicos en las diferentes estaciones de muestreo, ejecutando con éxito 4 proyectos de investigación enfocados en biodiversidad y ecosistemas marinos y costeros, 1 proyecto sobre el componente físico del medio marino, 2 proyectos en cultura y educación marina y costera, 1 en calidad ambiental marina y costera y 1 en ingenierías y tecnologías aplicadas.

Este esfuerzo conjunto no solo ha generado valiosos insumos científicos para la gestión del territorio marino y costero de Bocas de Sanquianga, sino que también ha fortalecido un modelo de cooperación intersectorial que integra el conocimiento científico con la sabiduría ancestral de las comunidades locales. La participación activa de los CCCN ha sido fundamental para asegurar que la investigación sea representativa y digna, resaltando la importancia de una gestión inclusiva y participativa en el desarrollo sostenible de la subregión Sanquianga-Gorgona.

Es así como el Programa Pacífico, del Plan Nacional de Expediciones Científicas Marinas (PNEC) ha establecido las bases para un manejo integral de los recursos marinos en una región inmensamente biodiversa pero de difícil acceso, integrando tanto la ciencia como el conocimiento tradicional como enfoques clave. Esto permitirá tomar decisiones informadas y sostenibles en beneficio de las futuras generaciones y contribuir a la preservación de los ecosistemas que representan un tesoro invaluable para todos. Mediante el PNEC, Colombia cuenta con un plan para las ciencias marinas, una estrategia destinada a conocer, dimensionar y proteger nuestro legado. Así, esta iniciativa busca fortalecer las capacidades de la nación para la toma de decisiones fundamentadas en la ciencia, incorporando y visibilizando el conocimiento ancestral del territorio.



### Biodiversidad registrada



**7448**  
Registros biológicos



A partir de  
**168**  
estaciones y/o localidades de muestreo

Esto permitió identificar

**242**  
especies



peces



reptiles



anfibios

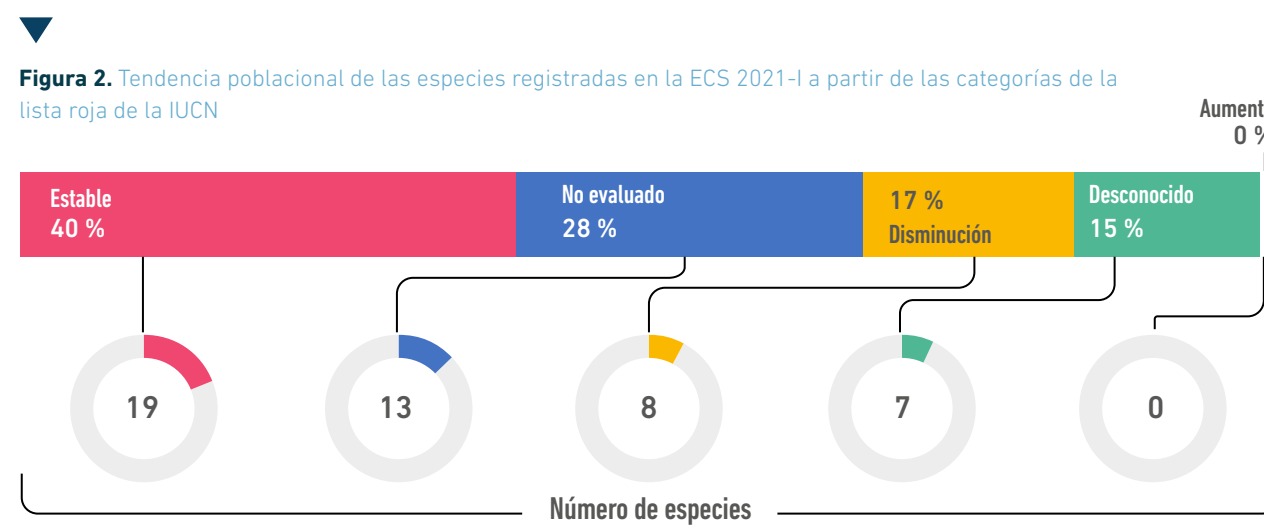
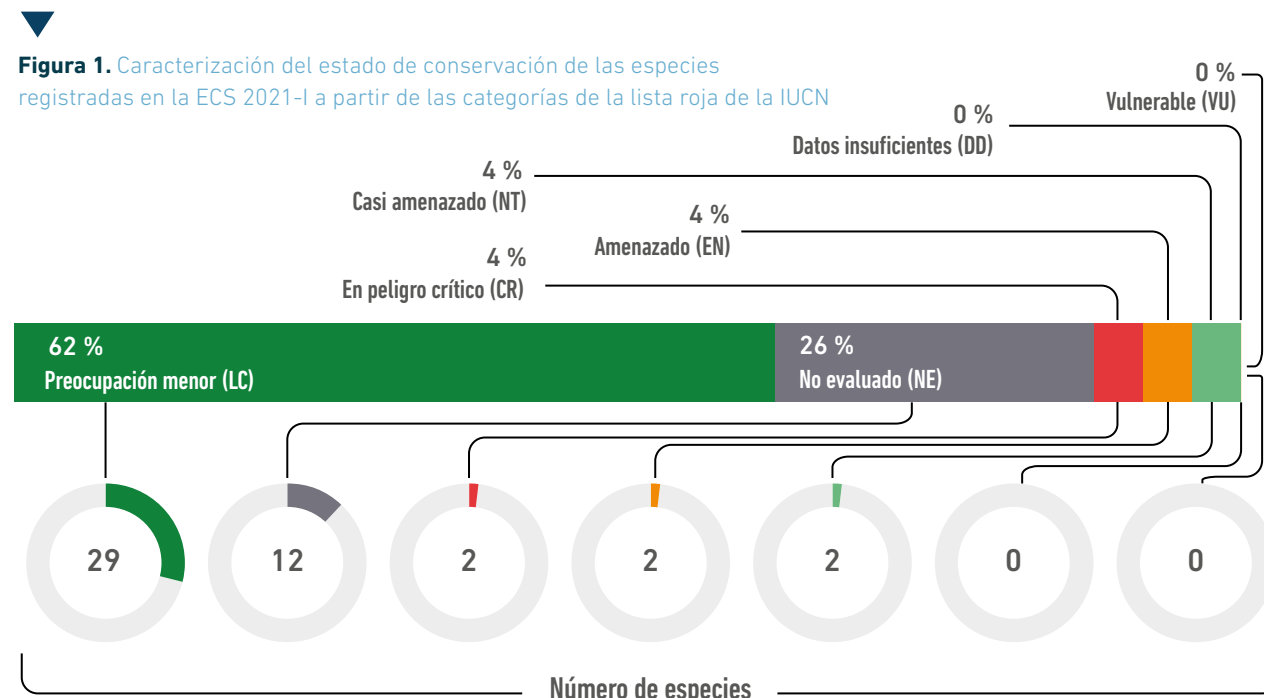


microorganismos

Las especies registradas fueron clasificadas de acuerdo con las categorías de conservación de lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) (**figuras 1 y 2**) y/o fueron publicadas en el Sistema de Información Biológica de Colombia (SiB Colombia). Las especies de los proyectos de microorganismos y de ictioplancton no se lograron categorizar dentro de la IUCN. Cabe anotar que las categorías de conservación brindan una herramienta crucial para el monitoreo de la biodiversidad y la planificación de medidas de conservación en el tiempo dentro de la región.

Los datos revelan que la mayoría de las especies registradas se encuentran en la categoría de «Preocupación Menor» (LC), lo que sugiere que no enfrentan riesgos inmediatos de extinción (**Figura 1**). Más de la mitad de las especies se clasifican con una tendencia poblacional estable, mientras que un porcentaje considerable se encuentra en estado de disminución o con información insuficiente sobre su tendencia poblacional (**Figura 2**).

Las cifras de las categorías NT, CR y EN, aunque no son significativas, no deben interpretarse como una razón para disminuir los esfuerzos de monitoreo y conservación. Estas categorías incluyen especies que ya muestran señales de vulnerabilidad, y su presencia, si bien es baja en número, sirve como una alerta temprana de los posibles riesgos que puede enfrentar la biodiversidad en el futuro. El monitoreo continuo y la implementación de estrategias de conservación específicas para las especies es fundamental para evitar que pasen a situaciones más críticas. Además, la falta de información suficiente en algunos casos subraya la necesidad de más investigación, ya que algunas especies podrían estar en un estado más grave de lo que los datos actuales reflejan.



### Tecnologías de la información

De forma transversal a los proyectos, se realizó el acompañamiento técnico previo, durante y posterior al desarrollo de la fase de campo, con el propósito de fortalecer los esfuerzos de investigación a través de herramientas de los sistemas de información geográfica. Con los datos suministrados y consolidados durante la fase de campo, se creó un micrositio web en donde se publicaron los datos geoespaciales con el fin de contribuir con el acceso abierto y equitativo a la información científica.



# Código de barras genético y riqueza taxonómica de la herpetofauna

Parque Nacional Natural Sanquianga y el Parque Nacional Natural Gorgona, Colombia

Augusto R. Acosta-Peña, Esteban Betancourt, Ana M. Saldarriaga-Gómez, Rodrigo Lozano Osorio, Andrés Cuéllar Chacón

Universidad Nacional de Colombia, PNN Sanquianga, DTPA Parques Nacionales Naturales

## Genómica para la conservación: descifrando la biodiversidad de la herpetofauna del sur del Chocó

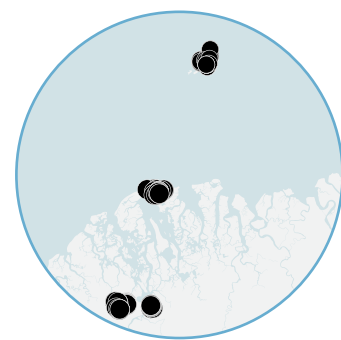
El Chocó biogeográfico es un tesoro global de biodiversidad que enfrenta amenazas inminentes por transformaciones aceleradas en sus ecosistemas (Alonso *et al.*, 2001). La falta de conocimiento biológico en esta zona sugiere la posible existencia de una diversidad no reconocida por la ciencia, compuesta por especies no descritas o no registradas en el país.

Hasta el momento, en Colombia se han registrado alrededor de 927 especies de anfibios y 591 de reptiles (Sistema de Información

sobre Biodiversidad de Colombia [SiB Colombia], 2022). Sin embargo, existe una escasez de datos sólidos y recientes sobre la diversidad taxonómica de estos grupos en la subregión sur de la costa del Pacífico, entre otras. En este contexto, el sur del Chocó, donde se encuentran los parques nacionales naturales (PNN) Gorgona y Sanquianga, emerge como una región prioritaria para la investigación de vertebrados.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de la fauna de la región y fortalecer las estrategias de conservación, se realizó un estudio que combinó el uso de códigos de barras genéticos y de datos morfológicos para caracterizar la diversidad taxonómica de las especies

de anfibios y reptiles en los PNN Gorgona y Sanquianga. Este enfoque ha demostrado ser útil en el apoyo a procesos de identificación de especies, y especialmente para entender la diversidad críptica de algunos grupos biológicos como los anfibios (Guarnizo *et al.*, 2015; Suriya *et al.*, 2020).



▲ Puntos de muestreo efectivos del proyecto

## La influencia de la geografía sobre la diversidad biológica: el caso de la genética

Las dinámicas e interacciones de las poblaciones de especies están determinadas por las características del *paisaje*, entendido en ecología como una región espacialmente heterogénea con diversos tipos de ecosistemas que interactúan entre sí. Por ello, es crucial desarrollar planes de conservación enfocados en proteger y utilizar sosteniblemente estos recursos naturales. Los resultados de este estudio ofrecen una línea base valiosa para fortalecer las estrategias de conservación, facilitando la planificación y gestión informada de estas áreas.

Las características del paisaje son determinantes para la diversidad biológica pues demarcan la manera en la que los genes fluyen entre las poblaciones. El proyecto se llevó a cabo en dos zonas con paisajes con una fisiografía particular, que determina patrones únicos en la diferenciación genética de las poblaciones de las especies que allí se distribuyen.

## Las Bocas de Sanquianga

En la subregión de Sanquianga las comunidades negras comprenden, disfrutan, habitan y protegen de manera colectiva sus territorios ancestrales. En esta zona costera desembocan los ríos Tapaje Viejo, Aguacatal, La Tola y Sanquianga, que forman un paisaje rico en deltas y estuarios que alberga cerca del 20 % de la cobertura de manglar del Pacífico colombiano (PNN,

2017). Los ecosistemas de manglar son de alta relevancia para las comunidades que habitan la zona pues protegen contra la erosión costera y proveen recursos forestales e hídricos (PNN, 2017).

La diversidad faunística es de gran importancia para el sostenimiento de los ecosistemas de los que dependen las comunidades ancestrales, y los procesos ecológicos que se llevan a cabo en estas áreas son determinantes para la estabilidad de los servicios ecosistémicos que proveen. Por esto, generar planes de conservación dirigidos a su protección y uso sostenible es de gran relevancia. Con los resultados de este estudio, se ha logrado generar una línea base para el fortalecimiento de las estrategias de conservación.

La exploración de la diversidad genética en esta llanura fluvial presenta una emocionante oportunidad de investigación, enfocada en comprender los procesos microevolutivos influenciados por los afluentes, los cuales, por ejemplo, pueden actuar como barreras reproductivas para especies con capacidad limitada de dispersión.



▲ Lobón  
*Holcosus* sp.

## Isla Gorgona

La isla Gorgona, ubicada a unos 42 km del continente en el departamento de Cauca, posee una fascinante historia geológica que ha dado lugar a la formación de selvas húmedas que albergan especies endémicas como el lagarto azul de Gorgona (*Anolis gorgonae*) y la serpiente tierrera (*Atractus medusae*), al igual que poblaciones con divergencia evolutiva como la de una especie del grupo de las ranas Arlequín (*Atelopus elegans gracilis*). Sin embargo, se desconoce la divergencia genética de las poblaciones de otras especies menos estudiadas que habitan la isla, como es el caso de las salamandras del género *Oedipina*. Bajo este escenario se plantean preguntas interesantes sobre la evolución y la adaptación de la vida en un entorno insular, que se hace necesario estudiar para diseñar estrategias de conservación de linajes únicos.

## De la selva a los genes

La recolección de ejemplares en los PNN Gorgona y Sanquianga resultó en la formación de una colección de referencia depositada en las colecciones de anfibios y reptiles del Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia y en la Colección de Anfibios y Reptiles de la Universidad del Valle. Por otro lado, las muestras de material genético se depositaron en el Banco de ADN y Tejidos de la Biodiversidad (BTBC) del Instituto de Genética (IGUN) de la Universidad Nacional de Colombia y se procesaron en el Laboratorio de Ecología Molecular de Vertebrados Acuáticos (LEMVA) de la Universidad de los Andes.

Para la identificación taxonómica de los especímenes, se realizó una

revisión morfológica junto con el uso de los marcadores moleculares (zonas específicas del ADN) con el fin de hacer un *barcoding* genético. El propósito de dicha técnica es emplear estas secuencias de ADN para determinar la identidad taxonómica de manera rápida y confiable.

Asimismo, después de secuenciar las muestras de ADN obtenidas en el campo en el LEMVA, se fortaleció el proceso de identificación de especies al contrastar la información morfológica con la genética utilizando bibliotecas de secuencias como el International Barcode of Life project (iBOL), Ratnasingham y Hebert (2013), y GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Esta metodología integrativa permitió revelar potenciales linajes evolutivos no reconocidos o no registrados en el territorio.

## Revelando la riqueza de los PNN Gorgona y Sanquianga

En una lista preliminar de especies del PNN Sanquianga se han documentado 14 especies de anfibios y 18 de reptiles. En contraste, en el PNN Gorgona se han identificado un total de 22 especies, distribuidas en 7 anfibios y 15 reptiles. Estos descubrimientos enriquecen sustancialmente la comprensión de la biodiversidad regional.

En el PNN Gorgona se recolectaron 60 muestras de tejido para la extracción de ADN, abarcando 21 especies entre anfibios y reptiles. El PNN Sanquianga, entretanto, aportó 35 muestras adicionales. Después del procesamiento, se obtuvieron un total de 354 secuencias de genes, claves para comprender la diversidad genética de los anfibios y reptiles en estos dos parques naturales.

## Descubrimientos notables: ampliando fronteras en el estudio de los anfibios y reptiles

Durante mucho tiempo la identidad de una especie de salamandra permaneció escondida en los bosques de la isla Gorgona. Esta situación se derivó de la falta de claridad en la clasificación de las especies del género *Oedipina* debido a su notable similitud morfológica y a la escasez de muestras de referencia en colecciones biológicas para su descripción. Ahora bien, en el marco de este proyecto se determinó que la especie *Oedipina complex*, como estaban identificadas las poblaciones de Gorgona, es realmente un complejo de muchas especies aún no descritas, por lo cual se deben realizar estudios con el fin de dilucidar la verdadera identidad de estas especies crípticas. Este es, en efecto, un claro ejemplo de la importancia del uso de los códigos de barras genéticos para descubrir la *diversidad críptica* en grupos biológicos donde la identificación es confusa y la taxonomía aún es inconclusa.

Adicionalmente a este evento, mediante el análisis de las secuencias de los marcadores moleculares se han detectado indicios de divergencia genética entre especies insulares y continentales. Esto abre un fascinante camino para la investigación de la biodiversidad de la región que vale la pena explorar en el futuro.

## El horizonte de la biodiversidad en el Pacífico colombiano: una línea base para la sostenibilidad

Este estudio innovador sobre la herpetofauna en los PNN Sanquianga y Gorgona no solo revela datos fascinantes sobre la diversidad de anfibios y reptiles, sino que también sienta las bases para el diseño de políticas de conservación bien fundamentadas. Sin embargo, si bien se encontró una alta diversidad taxonómica y se estableció una colección base de códigos de barras extensa, la poca cantidad de datos en los repositorios genéticos limita la comparación y el análisis de las secuencias. Por lo tanto, es crucial recolectar más datos y fomentar esfuerzos colaborativos. En ese sentido, se destaca la importancia de un monitoreo constante mediante técnicas de *barcoding*, proponiendo un enfoque integral para evaluar y gestionar la biodiversidad en los PNN del Pacífico colombiano.



◀  
Lobito  
*Cnemidophorus* sp.

◀  
Rana Arlequín  
*Atelopus elegans gracilis*

# Diversidad y abundancia relativa de elasmobranquios

Parque Nacional Natural Sanquianga y Gorgona, Colombia

Diego Cardeñoso, Maria Alejandra Herrera

Florida International University, NOVA Southeastern University

## Elasmobranquios en peligro: desafíos y oportunidades en la conservación global

La alarmante disminución de poblaciones de tiburones y elasmobranquios a nivel mundial ha elevado la protección contra la sobreexplotación como una prioridad global (Dulvy *et al.*, 2014; Simpfendorfer y Dulvy, 2017; Worm *et al.*, 2013). Con aproximadamente una cuarta parte de los tiburones y rayas en peligro de extinción y muchas especies mal estudiadas o al borde de la extinción, la situación demanda una

atención urgente (Dulvy *et al.*, 2014). La pesca excesiva para satisfacer la demanda de aletas y carne representa la amenaza más significativa para estas poblaciones, en especial en las plataformas continentales e insulares y, particularmente, en regiones tropicales y subtropicales (Worm *et al.*, 2013). No obstante, la falta de datos confiables obstaculiza la identificación precisa de áreas críticas y la implementación de medidas eficaces de conservación.

## Desafíos en la conservación

La insuficiencia de datos confiables sobre la abundancia y diversidad de elasmobranquios impide la evaluación precisa de la influencia de las presiones humanas en estas especies y dificulta la identificación de refugios de hábitat. Asimismo, la carencia de líneas base complica aún más los esfuerzos de restauración y la comprensión del impacto ecológico derivado del agotamiento global de los elasmobranquios. Este vacío de información es especialmente crítico ya que la remoción de grandes tiburones puede tener efectos profundos en la estructura del ecosistema, afectando a las presas y alterando comportamientos (Heithaus y Dill, 2006).

## Avances tecnológicos y oportunidades de investigación

A pesar de los desafíos, se ha realizado un número limitado de censos independientes utilizando diversos métodos, como líneas de pesca, redes, censos de buzos y videos remotos submarinos con cebo (BRUV por sus siglas en inglés) (Bond *et al.*, 2012; Jabado *et al.*, 2018; Morrissey y Gruber, 1993; Simpfendorfer y Burgess, 2002; Ward-Paige *et al.*, 2010). Aunque estos métodos presentan sesgos potenciales, el creciente uso de BRUV ofrece una oportunidad única para comparaciones significativas entre estudios. Este proyecto se centra en evaluar la diversidad y abundancia de elasmobranquios en Bocas de Sanquianga y en la isla Gorgona mediante palangres de pesca y BRUV, respectivamente. Los resultados se compararon con datos recopilados en otras áreas del Pacífico oriental tropical, proporcionando una visión integral para mejorar la gestión y conservación de estas especies amenazadas.

## Inmersión profunda: estrategias innovadoras en el estudio de elasmobranquios como metodología

### Exploración subacuática

En esta fase, la investigación se sumerge en el misterioso reino submarino, seleccionando sitios al azar para explorar la diversidad y abundancia relativa de elasmobranquios. En Gorgona se implementaron 39 BRUV equipados con cámaras GoPro y atractivo cebo de bonito (1 kg). Para abordar las desafiantes condiciones en Sanquianga, donde la visibilidad se redujo, se optó por palangres de pesca con aproximadamente 200 anzuelos, desplegados durante 45 minutos. Además, se complementó con líneas de tambor estandarizadas y anzuelos circulares cebados, utilizadas para la captura, la medición, el marcado, la determinación del sexo y la toma de muestras de tejido.

### Adaptación en el terreno submarino

Navegando a través de desafíos, el equipo ajustó la estrategia en Sanquianga al descubrir cero capturas con líneas de tambor en el primer día. Guiados por la sabiduría de los pescadores locales, que destacaron especies de menor tamaño, se redujo la cantidad de anzuelos en los palangres de 700 a 100-200. Utilizando carnada de sardina, se sumergieron los palangres entre 30 y 45 minutos para maximizar la captura.



Tiburón martillo común  
*Sphyrna lewini*



Puntos de muestreo efectivos del proyecto

Tiburón aletiblanco de arrecife  
*Triaenodon obesus*

### Análisis en las profundidades genéticas

Descendiendo más allá de lo superficial, se procesaron videos de 90 minutos capturados por los BRUV para registrar la diversidad de elasmobranquios. La abundancia relativa se calculó a partir del conteo máximo en un solo fotograma. La identificación genética siguió la meticulosa metodología de Cardenosa *et al.* (2014), comparando secuencias en bases de datos abiertas como BOLD Systems y GenBank.

### Bajo las olas: revelando la vida secreta de elasmobranquios en Gorgona y Sanquianga

#### Hallazgos en Gorgona

Se desplegaron 39 BRUV durante 4 días alrededor de la isla de Gorgona, grabando 90 minutos cada uno, para evaluar la abundancia relativa y diversidad de elasmobranquios. Se registraron dos especies de tiburones: *Carcharhinus limbatus* [maxN= 1] y *Triacodon obesus* [maxN= 3]. Además, se identificaron tres especies de rayas: *Rhinoptera steindachneri* [maxN= 7], *Hypanus longus* [maxN= 8] y *Narcine entemedor* [maxN= 1]. *T. obesus* fue la especie de tiburón más abundante, con 3 individuos, mientras que *H. longus* lideró entre las rayas con 8 individuos, seguida por *R. steindachneri*, con 7 individuos que viajaban en grupo. El censo estandarizado reveló una baja abundancia y diversidad de tiburones, y ningún individuo fue capturado mediante pesca con línea de tambor.

### Descubrimientos en Sanquianga

Debido a la turbidez del agua, no se instalaron BRUV en Sanquianga. Sin embargo, los muestreos con palangre capturaron un total de 12 individuos de 4 especies de tiburón (*Sphyrna corona* [n=9], *Sphyrna media* [n=1], *Mustelus* sp. [n=1], *Sphyrna vespertina* [n=1]) y un individuo de una especie de raya (*Gymnura crebripunctata* [n=1]). Las tres especies del género *Sphyrna* presentaron un alto grado de amenaza, con dos de ellas en peligro crítico de extinción. Todos los tiburones martillo capturados se consideraron adultos, con una longitud total de hasta 66,5 cm. La identificación de todas las especies se confirmó mediante *DNA barcoding*, y las muestras serán depositadas en la colección de muestras de Florida International University para futuros estudios.

### El asedio submarino: retos y soluciones para la conservación de tiburones y rayas en Gorgona y Sanquianga

#### Presiones submarinas en Gorgona

A pesar de contar con una vasta área marina protegida de 60 305,22 hectáreas, el Parque Nacional Natural Gorgona enfrenta un asedio persistente de la pesca ilegal. Las incautaciones de embarcaciones y la confiscación de tiburones en la costa del Pacífico nariñense subrayan la gravedad

de esta amenaza (Revista Semana, 2022; Corponariño, 2023). La Fundación Squalus ha documentado la presencia de hasta 5 especies de tiburones y 10 especies de rayas alrededor de la isla desde 2003. Sin embargo, comparaciones con el Pacífico de Costa Rica indican que la abundancia y la riqueza de estas especies podrían ser más altas en áreas no abiertas a la pesca, evidenciando la necesidad de fortalecer los controles y vigilancia contra la pesca ilegal (Espinoza *et al.*, 2020).

#### Desafíos en la exploración marítima

Aunque se identificaron posibles limitaciones estacionales en la detección de especies migratorias como el tiburón ballena o el tiburón martillo, el estudio revela la baja abundancia de especies con rango de distribución menor. *C. limbatus*, por ejemplo, se observó solo una vez, a pesar de extensos esfuerzos de muestreo. Especies menos móviles, como *Ginglymostoma unami*, también fueron ausentes en las observaciones. Estos resultados subrayan la importancia de mejorar la capacidad de control y vigilancia, así como la urgencia de establecer una línea base para tiburones y rayas que permita un monitoreo a largo plazo (Espinoza *et al.*, 2020).



Tiburón de puntas negras  
*Carcharhinus limbatus*

#### Amenazas en Sanquianga y acciones necesarias

En Bocas de Sanquianga, la presencia de tres especies de tiburón martillo gravemente amenazadas destaca la urgencia de acciones concretas. La captura diaria de estos tiburones como pesca incidental en palangres de más de 700 anzuelos revela la necesidad de medidas de conservación efectivas. Este hallazgo resalta la importancia de colaborar con las comunidades locales y adoptar estrategias que impacten positivamente en la conservación de especies críticamente amenazadas en la región.

#### Desafiando las corrientes convencionales

Los resultados en Gorgona y Sanquianga desafían las percepciones comunes, evidenciando que incluso en áreas marinas protegidas la presión pesquera ilegal puede ser significativa. La discusión destaca la necesidad apremiante de medidas de conservación más efectivas

y la importancia de un enfoque integral que incluya la revisión y el fortalecimiento de la capacidad de control y vigilancia, así como la creación de líneas de base sólidas para monitorear la vida marina a largo plazo. Estos hallazgos resaltan la urgencia de abordar y mitigar las amenazas actuales para garantizar la supervivencia de tiburones y rayas en estas vastas áreas marinas.

### Guardianes del abismo: un llamado urgente para la protección de tiburones en Colombia

La travesía por Bocas de Sanquianga y Gorgona revela un panorama vital para la conservación de los elasmobranquios en Colombia. Destacando la notable presencia de pequeños tiburones martillo, especie al borde de la extinción, en Bocas de Sanquianga, se subraya la urgencia de implementar medidas para reducir la pesca incidental, adoptando lecciones valiosas de experiencias exitosas como la de Bahía Málaga.

Contrariamente, los bajos registros de diversidad y abundancia

de tiburones en la isla Gorgona, aun tras exhaustivos esfuerzos de muestreo, plantea una realidad preocupante. La constante presencia de embarcaciones que pescan ilícitamente en el Parque Nacional Natural Gorgona enfatiza la necesidad imperante de reforzar el control y la vigilancia en esta área crítica.

En este contexto, se propone un enfoque integral que abarque: 1) conducir un estudio exhaustivo de los movimientos de especies amenazadas, como *S. corona*, en Bocas de Sanquianga para mitigar la pesca incidental; 2) implementar acuerdos colaborativos con las comunidades locales, replicando éxitos previos en Bahía Málaga; y 3) fortalecer la vigilancia y el control en el Parque Nacional Natural Gorgona para salvaguardar las poblaciones de tiburones y contrarrestar la pesca ilegal.

Estos hallazgos y propuestas subrayan la necesidad crítica de acciones concretas para preservar la vida marina en estas áreas cruciales. En este esfuerzo, se erige la responsabilidad de ser guardianes comprometidos, rescatando los tesoros marinos de Colombia y asegurando la supervivencia de estos fascinantes habitantes del océano para las generaciones futuras.

# Creación de un sistema de información geográfica integrada y sus herramientas geomáticas asociadas como aporte a la conservación y desarrollo sostenible de los servicios ecosistémicos

## *Bocas de Sanquianga*

Paola Echeverry Hernández, Kevin Henao López, Stephany Montoya Sáchica

**Dirección General Marítima (DIMAR)**

Nuestro vínculo constante con el conocimiento espacial ha revelado los secretos de nuestro entorno y los fenómenos que lo moldean. En la búsqueda de una gestión sabia de nuestro territorio, hemos incurrido en el dominio de las tecnologías espaciales, descubriendo un universo de posibilidades para comprender la localización, la distribución, las asociaciones y las interacciones que definen nuestro planeta Tierra (Ortega, 2000). En este contexto, la expedición científica marina en el Parque Natural

Nacional Bocas de Sanguinea, Colombia (Expedición Científica Pacífico 2021-I), representó un viaje emprendido con el noble propósito de preservar y cultivar los tesoros ecológicos de esta región. A través de los principios de conservación y desarrollo sostenible, se ha identificado la necesidad de establecer un vínculo tangible entre el conocimiento y la acción en el contexto del Pacífico colombiano.

Con el anterior propósito, la Dirección General Marítima (DIMAR)

ha desarrollado un sistema de información geográfica (SIG) que integra la ciencia de la información geográfica específica de esta región en el marco del Plan Nacional de Expediciones Científicas. Más que una simple recopilación de datos, este SIG se presenta como un faro de orientación que puede ser la base de decisiones informadas y responsables en la gestión y preservación de los valiosos recursos naturales que caracterizan esta área del país.

### Creación de un ambiente geoespacial

Para proporcionar una comprensión integral de la información recopilada y alcanzar un entendimiento compartido sobre el Pacífico colombiano, se ha establecido un compromiso con la prestación continua de apoyo a los investigadores en todas las fases del proceso. Esta responsabilidad se materializa mediante el uso de herramientas cartográficas y tecnologías geoespaciales avanzadas.

Durante la fase de campo de la expedición, la aplicación de tecnologías como el WebGIS (sistemas de información geográfica accesibles a través de aplicaciones web y móviles) ha demostrado ser invaluable para la planificación precisa de los puntos de muestreo y la adquisición eficiente de datos en el terreno. Además, estas herramientas se han personalizado específicamente para divulgar los resultados del estudio a la comunidad, promoviendo un mayor entendimiento del territorio y fomentando su apropiación por parte de las comunidades locales (Henao y Montoya, 2021).

Mediante el uso de modelos de geoinformación como las *web layers* (capas web), *web maps* (mapas web) y *web scenes* (escenas 3D), se ha creado una plataforma de fácil acceso que permite compartir los hallazgos con el público de manera clara y comprensible. Este enfoque innovador no solo facilita la difusión de información técnica y científica entre la comunidad marítima y la población en general, sino que también promueve la colaboración y el intercambio de conocimientos.

Además, el proyecto se destaca por su compromiso continuo con iniciativas complementarias, como la publicación de aplicaciones web y la elaboración de mapas temáticos, con el objetivo de amplificar el impacto y la relevancia de la investigación científica marina en la sociedad. En el enlace <https://expedicion-pacifico-dimar.hub.arcgis.com/> podrá acceder a los recursos geoespaciales generados durante las expediciones en el Pacífico colombiano. Aquí encontrará información detallada sobre los puntos de muestreo, datos recopilados en el terreno y resultados cartográficos que proporcionan una visión completa de la región.



## El contexto geográfico en el muestreo

En el contexto geográfico del muestreo, se establece una conexión fundamental entre los datos recopilados y la comprensión de los fenómenos que caracterizan el entorno estudiado. Durante la expedición científica, los datos capturados en el campo representan una manifestación simbólica de la realidad, pero es a través de su procesamiento que adquieren significado y se convierten en información útil y aplicable, siguiendo el concepto de la «pirámide del conocimiento» propuesto por Russell

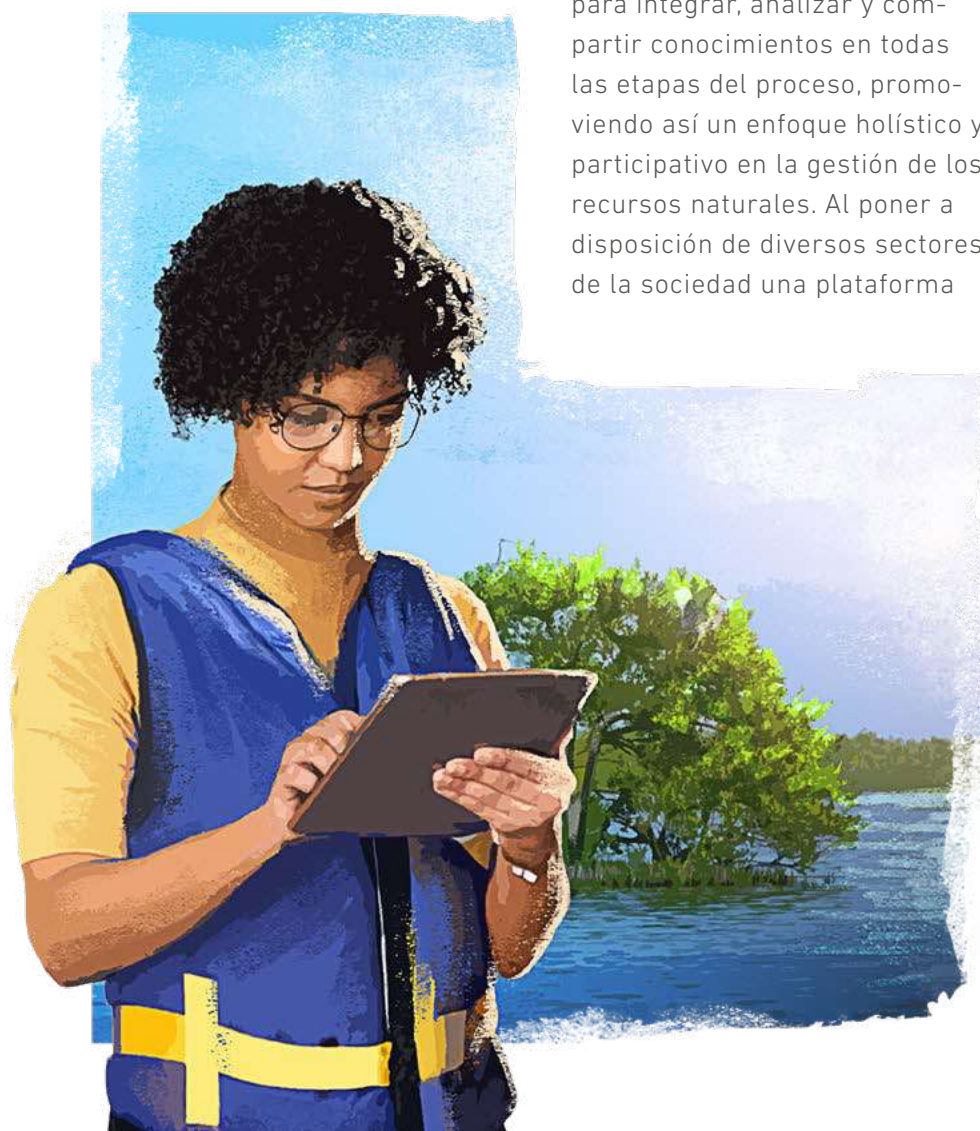
Ackoff. Esta información, organizada de manera coherente y dirigida a un propósito específico, sirve como base para la construcción del conocimiento, mediante el cual, en últimas, se logra identificar patrones, resolver problemas y tomar decisiones informadas en el ámbito de la gestión ambiental y territorial.

En este sentido, el SIG del Pacífico colombiano no solo se presenta como una herramienta de gestión de datos geospaciales, sino como un facilitador del proceso que va desde la recolección de información hasta la generación de sabiduría. Su valor radica en su capacidad para integrar, analizar y compartir conocimientos en todas las etapas del proceso, promoviendo así un enfoque holístico y participativo en la gestión de los recursos naturales. Al poner a disposición de diversos sectores de la sociedad una plataforma

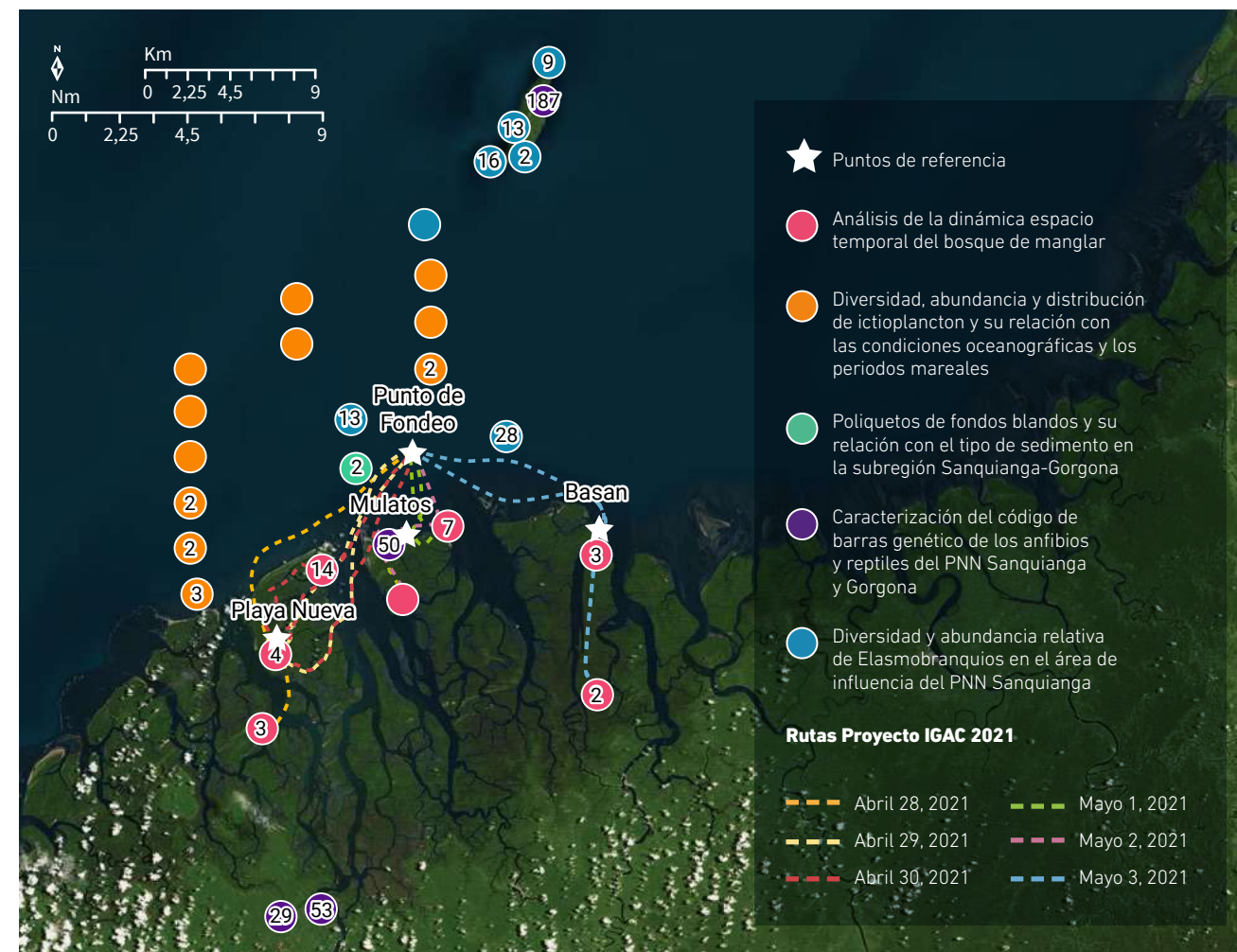
que considere diferentes perspectivas, roles y necesidades, el SIG no solo fortalece la toma de decisiones basada en evidencia, sino que también fomenta la colaboración y el entendimiento mutuo en la búsqueda de soluciones sostenibles para la región del Pacífico colombiano.

## Mapas temáticos y dinámicos como resultados

Los mapas son herramientas visuales poderosas que permiten representar de manera clara y comprensible la información recopilada durante el trabajo de campo. Esta cartografía no solo muestra la distribución geográfica de los datos, sino que también proporciona un análisis detallado de las variables estudiadas. Así, los mapas temáticos, por una parte, resaltan patrones y tendencias en los datos, mientras que los mapas dinámicos, por otra parte, permiten explorar interacciones y cambios a lo largo del tiempo o el espacio. Por lo tanto, estas representaciones son elementos fundamentales para comunicar los hallazgos de una investigación de manera efectiva y facilitar la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental y territorial. La **Figura 3.1** ejemplifica esta importancia al mostrar visualmente los resultados de los muestreos realizados durante la expedición.



**Figura 3.1.** Mapas dinámicos resultado del análisis inicial de los proyectos de CIOH Pacífico – IGAC y Herpetofauna



## Conectando ciencia y tecnología: conclusiones clave de la Expedición Científica Pacífico 2021-I

La Expedición Científica Pacífico 2021-I ha demostrado de manera contundente que la interacción entre la ciencia y las herramientas geomáticas es esencial para una difusión efectiva de la investigación y sus hallazgos. Los investigadores, tras el muestreo, desempeñan un papel crucial al proporcionar los resultados científicos para su almacenamiento en la base de datos

geográfica (GDB por sus siglas en inglés). Esta acción permite llevar a cabo análisis holísticos en el futuro, desarrollar nuevos productos de investigación y enriquecer los existentes, contribuyendo así al progreso continuo del conocimiento científico.

De igual forma, la unificación de la información se revela como un paso esencial para poner a disposición de la comunidad el conocimiento generado durante la expedición. La efectividad de este proceso depende de centralizar la información en un

único portal que sea sencillo, intuitivo, de fácil acceso y amigable con el usuario (Henao y Montoya, 2021).

En definitiva, la conexión entre la ciencia y la tecnología cumple una función fundamental en la difusión y el aprovechamiento de los valiosos resultados obtenidos en la Expedición Científica Pacífico 2021-I. Este enfoque integrado garantiza que la ciencia sea accesible y aplicable, impulsando así el avance del conocimiento y la mejora de las comunidades locales.

# Presencia de *Vibrio* spp. en la subregión Sanquianga-Gorgona y su relación con las condiciones hidrográficas

Jenny Parada, Christian Bermúdez-Rivas, Yadi Moreno, Fredy Castrillón, Brainer Ángel

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico  
Dirección General Marítima

## Una odisea global desde los trópicos hasta las regiones boreales

La distribución global de las especies de *Vibrio* revela disparidades notables, siendo más abundantes y diversas en entornos tropicales a lo largo de todo el año. En contraste, en regiones boreales como el Ártico, la presencia de *Vibrio* es menos frecuente y diversa debido a las bajas temperaturas, aunque se detectan organismos viables pero no cultivables en invierno. Además, en ambientes boreales predominan especies psicrófilas de *Vibrio* adaptadas a bajas temperaturas, mientras que en entornos tropicales se encuentran especies mesófilas adaptadas a temperaturas más cálidas (Thompson *et al.*, 2006).

La familia Vibrionaceae abarca una amplia gama de bacterias heterótrofas autóctonas que se distinguen por su preferencia por ambientes marinos y estuarinos, atribuida a su necesidad de sodio para el crecimiento (Oliver y Oliver, 2007). Dentro del género *Vibrio*, se registran alrededor de 115 especies confirmadas de bacilos Gram-negativos, con aproximadamente una docena capaces de causar infecciones en seres humanos (Wong *et al.*, 2019).

## Microcosmos patógeno: *Vibrio* y sus historias de enfermedad

Las especies de *Vibrio* están asociadas con enfermedades en peces, camarones, corales y humanos (Ceccarelli y Colwell, 2014; Rosenberg y Falkovitz, 2004; Thompson *et al.*, 2006). Entre ellas se destaca *Vibrio cholerae*, causante del cólera, cuya transmisión se vincula a la ingesta de alimentos o agua contaminada (Thompson *et al.*, 2006). Otras especies patógenas incluyen *Vibrio parahaemolyticus* y *Vibrio vulnificus*, habituales en aguas estuariales y diversos mariscos y responsables de la «vibriosis», con infecciones asociadas al consumo de animales de mar (Oliver y Oliver, 2007).

## Desentrañando las conexiones entre factores ambientales y riesgos sanitarios

La comprensión de la epidemiología y los riesgos de contaminación de estas enfermedades requiere un análisis profundo de la ecología de los *Vibrio* y su relación con las condiciones ambientales. Estudios previos han identificado factores como temperatura, salinidad y concentraciones de nutrientes como influencias significativas en la distribución y abundancia de estas especies (Wong *et al.*, 2019). No obstante, estas relaciones son complejas y dependen de la resolución taxonómica (Takemura *et al.*, 2014). Además, las especies de *Vibrio* establecen estrechas asociaciones con organismos planctónicos, especialmente

crustáceos como los copépodos, aprovechando la quitina exoesquelética como fuente de nutrientes (Turner *et al.*, 2009).

En este contexto, el presente estudio se propone evaluar la incidencia del género *Vibrio* spp. mediante modelos lineales generalizados y algoritmos de aprendizaje automático. El objetivo es identificar las variables hidrográficas que explican la presencia de estas bacterias, contribuyendo así a comprender y prevenir posibles riesgos para la salud pública y los ecosistemas marinos (Córdoba *et al.*, 2021). Este enfoque busca llenar un vacío en la investigación al explorar no solo la abundancia, sino también la presencia específica de *Vibrio* en relación con las condiciones ambientales, ampliando nuestra comprensión de las complejas interacciones entre estos microorganismos y su entorno.



▲ Puntos de muestreo efectivos del proyecto



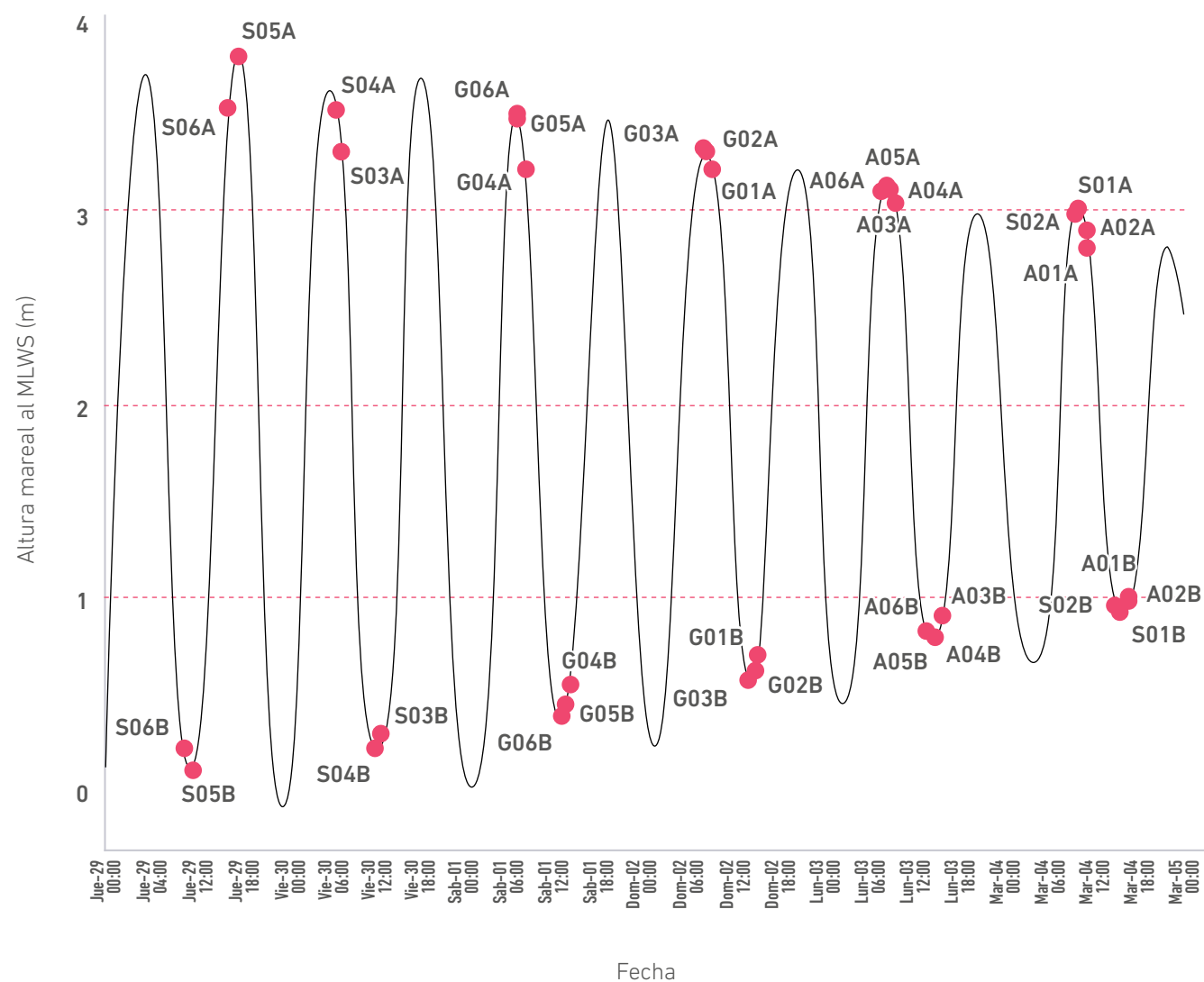
### Exploración marina: muestreo integral en las bocas del río Sanquianga

Se visitaron 18 estaciones de muestreo en marea alta y en marea baja (**Figura 4.1**) en tres transectos en las bocas del delta del río Sanquianga (**Figura 4.2**).

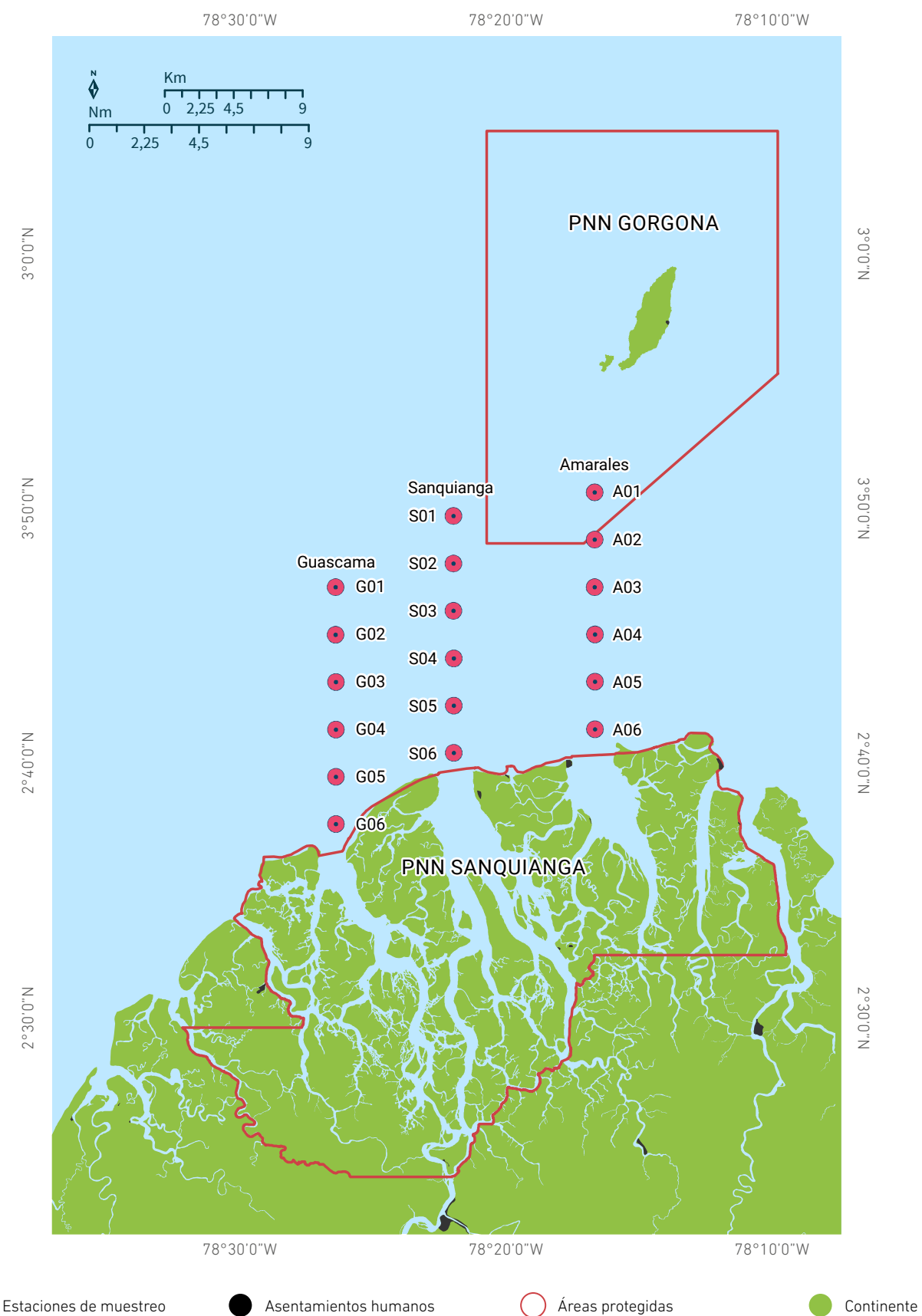
Se recolectaron muestras de agua para cultivos de *Vibrio* spp. y se llevaron a cabo análisis físico-químicos utilizando botellas esterilizadas y botellas Niskin de 10 litros. Además, se filtraron 20 litros de agua para evaluar la riqueza del fitoplancton y se recolectaron muestras de zoo-

plancton con una red tipo bongo. Las mediciones ambientales se realizaron con equipos especializados. Todas las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) del Pacífico en Tumaco (**Figura 4.3**).

**Figura 4.1.** Comportamiento de la onda mareal entre el 28 de abril y el 7 de mayo de 2021 (se señala el momento de recolección de las muestras en cada una de las estaciones)



**Figura 4.2.** Área de estudio: región Sanquianga-Gorgona



● Estaciones de muestreo    ● Asentamientos humanos    ○ Áreas protegidas    ● Continente



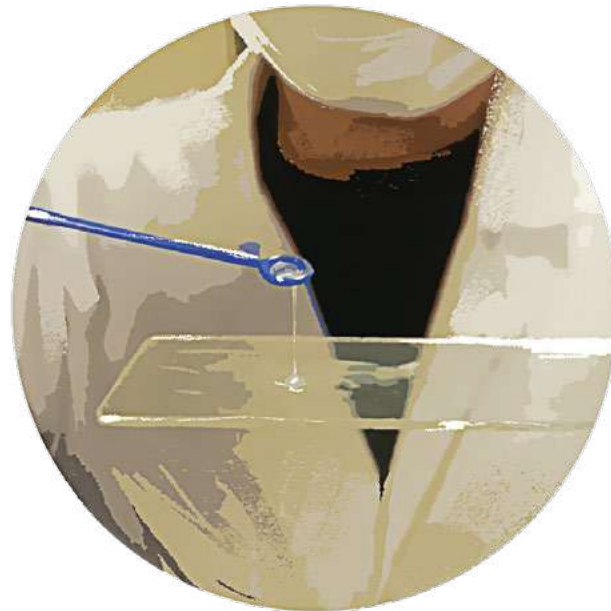


**Figura 4.3.** Toma y procesamiento de muestras: (a) toma de muestras de agua en las estaciones de muestreo; (b) proceso de inoculación con asa de aro en el medio de cultivo; (c) laboratorio de procesamiento de las muestras de microbiología; (d) siembra de las muestras de *Vibrio* spp.

A.



B.



C.



D.



### Detalles intrínsecos de las mediciones químicas

Durante la expedición se realizaron mediciones clave de oxígeno disuelto (OD), salinidad y pH utilizando equipos especializados. Las muestras para ensayos de nutrientes y clorofila *a* fueron tratadas y analizadas en el laboratorio del CIOH del Pacífico, cumpliendo con la norma NTC ISO/IEC 17025:2017. Asimismo, se aplicaron métodos colorimétricos bien establecidos para nitritos, nitratos, silicatos y fosfatos.

En cuanto al pH y la salinidad, se emplearon métodos específicos.

También se utilizaron procedimientos precisos para sólidos suspendidos totales y oxígeno disuelto. Finalmente, la clorofila *a* se determinó siguiendo el método tricromático 10200 H. Estos rigurosos protocolos garantizaron resultados confiables y precisos, proporcionando una valiosa comprensión de las condiciones oceanográficas evaluadas.

### Análisis profundo del fitoplancton en el Pacífico

En el laboratorio del Área de Protección del Medio Marino (APROMM) del CIOH Pacífico se llevó a cabo un análisis detallado de mues-

tras biológicas, centrándose en la cuantificación y la identificación de células de fitoplancton. Utilizando tecnología avanzada, se observaron las células con microscopios especializados, las cuales se verificaron taxonómicamente utilizando fuentes de referencia confiables como claves taxonómicas y la base de datos Algaebase. La densidad celular en el agua se extrajo del conjunto de fitoplancton en el área, proporcionando valiosa información sobre la diversidad y composición de estos microorganismos en el entorno marino estudiado. Estos análisis contribuyen a nuestro entendimiento de la vida marina y su papel crucial en los ecosistemas acuáticos.

### Un análisis integral de las variables ambientales marinas

Se recopilieron datos exhaustivos para 17 variables ambientales hidrográficas, seis variables químicas (nitratos, fosfatos, silicatos, pH, oxígeno disuelto), cinco variables físicas (transparencia del agua, temperatura superficial del mar, salinidad superficial del mar, densidad del agua superficial) y cinco biológicas (clorofila *a* superficial, densidad de primer y segundo orden). Estos datos proporcionan una visión completa de las condiciones del entorno marino, desde factores químicos

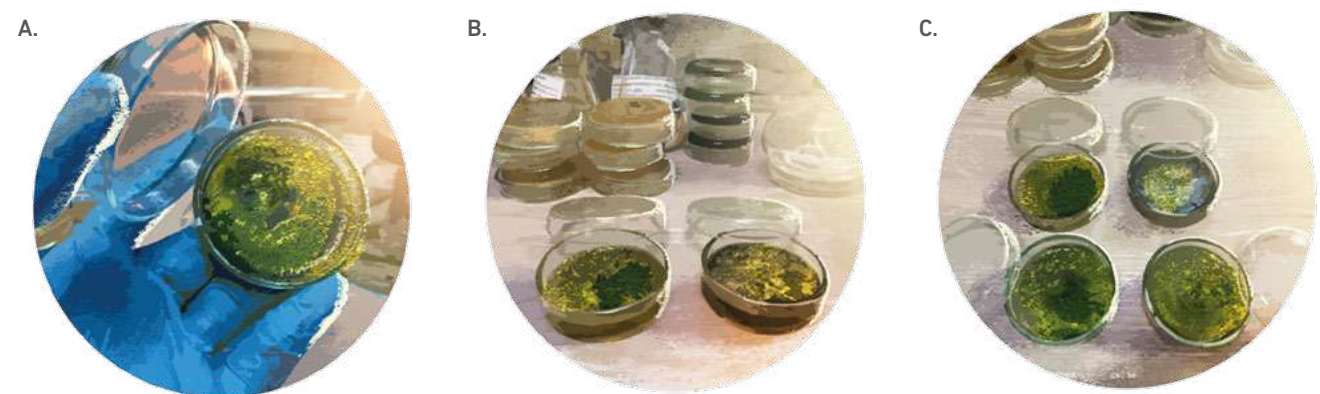
hasta variables biológicas, contribuyendo significativamente a nuestra comprensión de los ecosistemas acuáticos. Por último, se utilizó un Modelo General Linealizado (GLM) para evaluar y crear modelos de relación entre la incidencia de *Vibrio* y las variables obtenidas.

### Incidencia de *Vibrio* spp. en relación con las condiciones de marea

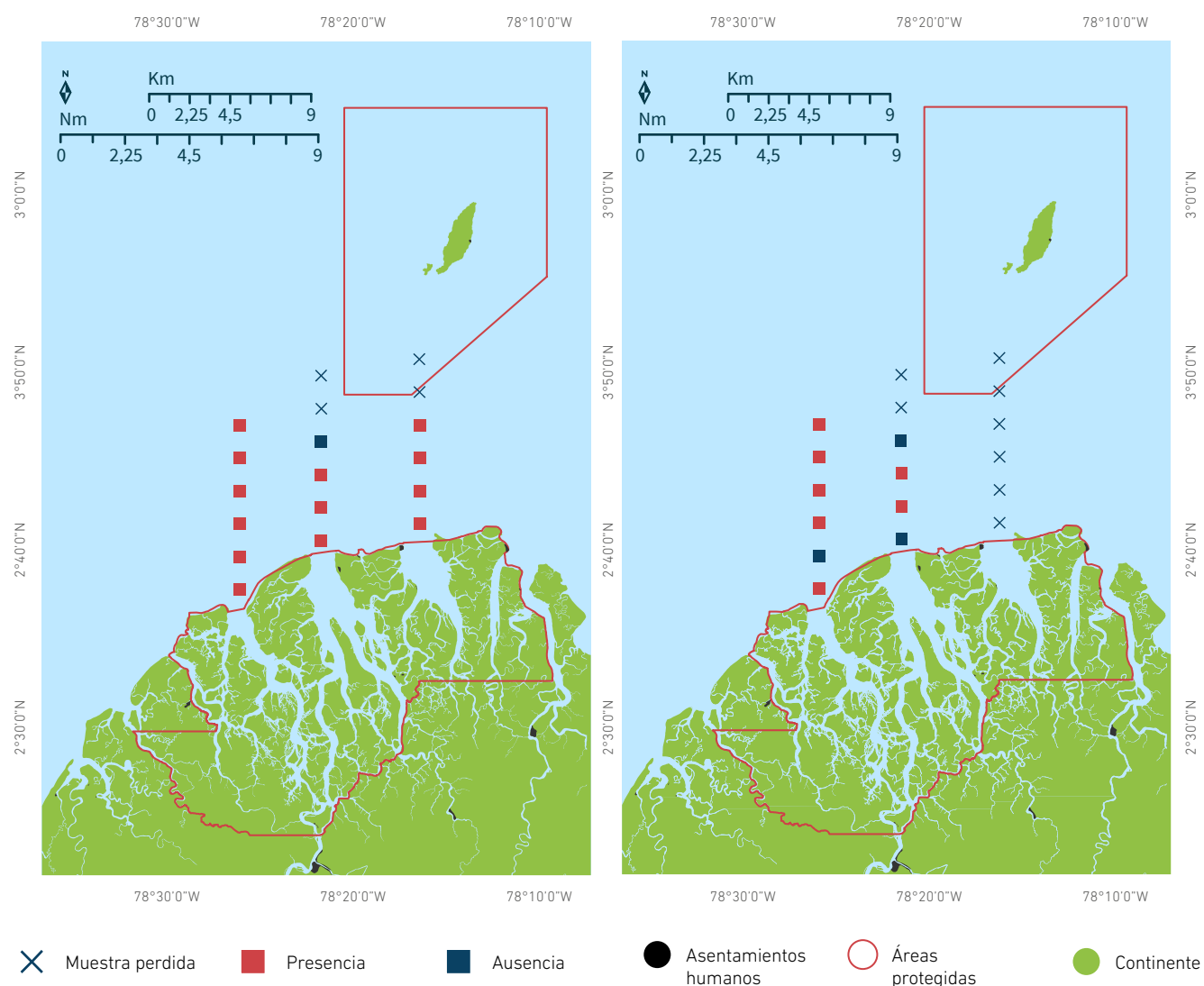
De las 36 muestras recolectadas, solo para el 66 % (24 muestras) se obtuvieron resultados y se logró cultivar exitosamente (Figura 4.4), ya que 12 muestras fueron afectadas por hongos y tuvieron que descartarse. Se registró una incidencia

de *Vibrio* spp. del 83,3 %, mientras que la ausencia fue del 16,67 %. Durante la marea alta, se identificaron 13 estaciones con presencia de *Vibrio* spp. y una estación sin presencia, mientras que durante la marea baja se registraron seis estaciones con presencia y tres sin presencia. En general, la marea alta aportó con el 65 % de todas las presencias en el muestreo, mientras que la marea baja aportó el 35 % del total de presencias. En cuanto a las ausencias, el 25 % se registró durante la marea alta, y el 75 %, durante la marea baja (Figura 4.5). Estos hallazgos ofrecen una visión detallada de la incidencia de *Vibrio* spp. en relación con las condiciones de marea.

**Figura 4.4.** Resultados de los cultivos con agar TCBS que confirman visualmente la presencia de *Vibrio* spp. (a, b y c) mediante el color verde típico de este tipo de cultivo



**Figura 4.5.** Incidencia de *Vibrio* spp. en la subregión Sanquianga-Gorgona durante mareas alta y baja



### Resultados claves

#### Invasión bacteriana en alta mar

A pesar de las dificultades logísticas, se observó una alta presencia de *Vibrio* spp. cercana al 80 % en todas las muestras revisadas, resaltando la robustez de este género bacteriano en el entorno marino.

#### Batalla química y mareal

Se identificaron diferencias significativas en la concentración de nutrientes nitrogenados y silicatos, mientras que las variables relacionadas con el fitoplancton no mostraron variaciones sustanciales. La concentración de oxígeno disuelto, la transparencia, la densidad del agua y la salinidad presentaron diferencias significativas en relación con los cambios mareales.

#### Misterios del mar revelados

El análisis de componentes principales reveló que el oxígeno disuelto, el pH y los sólidos suspendidos totales fueron las variables que más contribuyeron a la variabilidad del sistema, estableciendo conexiones con factores físicos, químicos y biológicos.

#### Enigma de las relaciones bacterianas

La relación entre la incidencia de *Vibrio* spp. y las condiciones mareales no fue evidente debido al desbalance de datos. Los modelos

supervisados destacaron la importancia de la salinidad y la temperatura en la predicción espacial de la incidencia, mostrando condiciones óptimas para la presencia de *Vibrio* durante la marea alta.

### Consideraciones para futuras investigaciones

Se subraya la necesidad de estudios adicionales que exploren las complejas relaciones entre las especies de *Vibrio* y las condiciones ambientales, sugiriendo que los algoritmos de clasificación supervisada pueden ser valiosos si se entrenan con datos más amplios y variados.

### Relevancia para la salud pública

La investigación destaca la importancia de comprender las condiciones ambientales que favorecen la presencia de *Vibrio* spp., especialmente dada su asociación con enfermedades gastrointestinales. Estos resultados proporcionan insumos cruciales para sistemas de alerta temprana y estrategias de prevención en zonas afectadas por estas bacterias patógenas.

### Maravillas ocultas: *Vibrio* y sus secretos en las aguas misteriosas

A pesar de algunos desafíos en el laboratorio, en este estudio se lograron destilar fascinantes conexiones alrededor del comportamiento de estas criaturas. Por una parte, resulta que *Vibrio* spp. muestra preferencia por ciertas condiciones, como la temperatura y la salinidad, que actúan como directores de orquesta, influenciando cuándo y dónde aparecen estas especies. Por otra parte, en esta travesía, algunos algoritmos brillaron con luz propia en el proceso de clasificación, mientras que otros, como el enigmático K-Nearest Neighbour, mantuvieron su halo de misterio. Aunque las predicciones actuales deben tomarse con precaución, este estudio marca el comienzo de una emocionante búsqueda científica en donde el fascinante microcosmos marino aún guarda secretos por descubrir.



# Características estructurales de los bosques de manglar más altos del continente americano: una comparación de medidas en tierra, con drones y de radar



Gustavo A. Castellanos-Galindo<sup>1,2,3\*</sup>, Elisa Casella<sup>3</sup>, Hector Tavera<sup>4</sup>, Luis Alonso Zapata Padilla<sup>1</sup> y Marc Simard<sup>5</sup>

<sup>1</sup> WWF Colombia, Cali, Colombia, <sup>2</sup> Smithsonian Tropical Research Institute (STRI), Panama City, Panama, <sup>3</sup> Leibniz Centre for Tropical Marine Research (ZMT), Bremen, Germany, <sup>4</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, <sup>5</sup> Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, United States

**Aclaración:** *el presente texto es un resumen en español de la publicación Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Tavera, H., Zapata, L. A. y Simard, M. (2021). Structural Characteristics of the Tallest Mangrove Forests of the American Continent: A Comparison of Ground-Based, Drone and Radar Measurements. Front. For. Glob. Change, 4, 732468. 10.3389/ffgc.2021.732468, que se distribuye sobre los términos de [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#).*

## Explorando el tesoro ecológico: el rol fundamental de la teledetección espacial en el monitoreo de manglares

La teledetección espacial (SRS, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta indispensable para comprender fenómenos terrestres y monitorear la biodiversidad (Pettorelli et

al., 2016). En este contexto, ecosistemas como los manglares han experimentado un seguimiento acelerado de mapeo gracias a la disponibilidad de productos satelitales generalmente gratuitos (Worthington et al., 2020).

El estudio global de estos ambientes, con productos de referencia como los de Giri et al. (2011) y Bunting et al. (2018, 2022), ha permitido

realizar estimativos de características importantes de los manglares, como la biomasa sobre el suelo (AGB) y el carbono (AGC), a escalas regionales y globales (Hamilton y Friess, 2018; Rovai et al., 2016).

## Drones y manglares: desafiando limitaciones con alta resolución

Este estudio se centra en el papel revolucionario de los drones para superar algunas limitaciones de SRS en áreas pequeñas de manglar (<100 ha) (Castellanos-Galindo et al., 2019). Ejemplos de mapeo a escala de centímetros con drones (Li et al., 2019; Navarro et al., 2020; Otero et al., 2018) destacan su potencial para ofrecer productos de mayor resolución, revelando perspectivas únicas sobre procesos ecológicos en estos ecosistemas.

## Revelando los secretos de los manglares gigantes de la eco-región del Panama Bight

El enfoque se dirige a la eco-región del *Panama Bight* (que incluye las costas del Pacífico de Panamá, Colombia y norte de Ecuador), hogar de uno de los ecosistemas de manglares mejor conservados de América (Spalding et al., 2007). Se resalta la costa sur de Colombia y norte de Ecuador, reconocida por tener los manglares más altos globalmente (Simard et al., 2019). Factores geomorfológicos, alta precipitación y características locales contribuyen a las dimensiones notables de estos manglares.

## Desentrañando los misterios de los manglares en la costa del Pacífico colombiano

La zona de estudio, caracterizada por llanuras aluviales e islas barrera muy dinámicas, plantea desafíos logísticos debido a su lejanía, que demanda viajes extensos en bote o en pequeñas aeronaves (Castellanos-Galindo et al., 2021). Este aislamiento ha limitado la exploración científica, lo que destaca la necesidad de técnicas innovadoras para obtener información ecológica reduciendo los costos económicos que implican las investigaciones en estas zonas tan remotas.

### Validación a nivel del suelo: comparando métodos para revelar la altura y la biomasa de los manglares

Para validar mediciones previas por teledetección y evaluar la complementariedad de técnicas, este estudio comparó la altura de árboles y la biomasa de manglares utilizando inventarios en tierra, imágenes de drones y datos de radar. Esta combinación proporcionó una oportunidad única para entender las ventajas y las limitaciones de los diferentes métodos y reconocer la urgente necesidad de protección en estas áreas excepcionales.

### Exploración de la riqueza ecológica: el encanto de la costa pacífica colombiana

Dos tercios de la costa pacífica colombiana están cubiertos por manglares, representando cerca de 80 % del área total de manglares de Colombia. Con precipita-

ciones anuales excepcionales que superan los 2000 mm y alcanzan hasta 8000 mm, las aguas costeras de esta región experimentan bajas salinidades permanentes.

La zona costera de Nariño, el departamento más al sur, se destaca por sus dinámicos deltas, extensos manglares y una infraestructura limitada. Alberga la mayor área marina protegida de manglares en el Pacífico tropical oriental (Parque Nacional Natural Sanquianga) y una nueva área protegida que colinda con Ecuador (cabo Manglares). En esta región, la descarga del río Iscuandé es de 6,71 km<sup>3</sup> por año.

### Muestreo en campo: exploración de manglares en Nariño

En noviembre de 2019 se realizaron muestreos en tres sitios de manglares seleccionados para evaluar la biodiversidad en la costa norte del departamento de Nariño

cercanos a la desembocadura del río Iscuandé (figura 5.1). Se establecieron parcelas circulares de 15 m de diámetro en cada sitio, donde se realizaron mediciones de especies, diámetro de árboles a la altura del pecho (DBH, por su sigla en inglés) y altura total. Se utilizaron cintas métricas e hipsómetros láser para obtener medidas precisas. Estos datos, geolocalizados con GPS, ofrecen una visión detallada de la estructura y distribución de los manglares en esta región clave del Pacífico colombiano.

### Método simplificado para evaluar biomasa en manglares

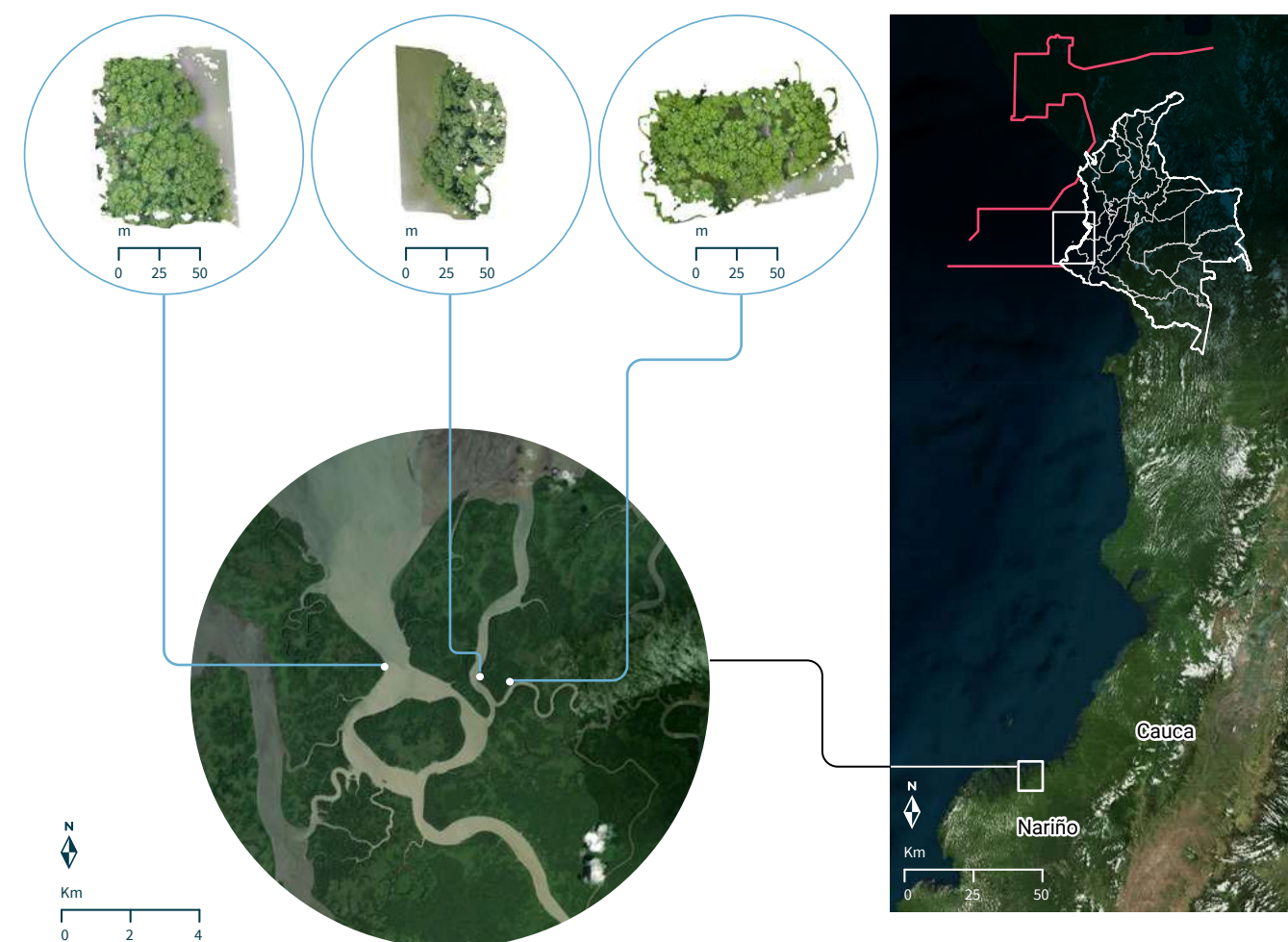
Se adoptó un enfoque directo al medir la biomasa de los manglares. Utilizando solo el DBH, se aplicaron dos ecuaciones alométricas. La primera, de Fromard *et al.* (1998) para *Rhizophora mangle*, se expresó como  $AGB = 0,1282 \times D^{(2,6)}$ .

También se implementó el modelo de Chave *et al.* (2014), diseñado para árboles tropicales considerando DBH, altura y densidad de la madera ( $\rho$ ). Esta última variable, en particular, se calculó como el promedio de los valores para *Rhizophora* spp. en la base de datos global de densidad de madera.

Ajustando el modelo a la ecuación de Chave *et al.* (2014), se retrocalcularon las alturas de los árboles con solo información de DBH.



**Figura 5.1.** Ubicación de los sitios de manglares visitados en la costa sur del Pacífico colombiano (desembocadura del río Iscuandé, departamento de Nariño). Imágenes ©2021 Google, Maxar Technologies, Datos SIO, NOAA, Armada de los EE. UU., NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus, Imágenes ©2021 Terrametrics. Datos de mapas ©2021. Se encuestaron tres parches de manglares en el complejo estuarino formado cerca de la desembocadura del río Iscuandé. De izquierda a derecha, los sitios son conocidos como: Punta del Codo, La Rotura y Madrid. Imagen tomada de Castellanos-Galindo *et al.* (2021)



### Uso de drones en la investigación de manglares

Finalmente, se determinó el carbono vivo total utilizando la relación 1:0,464 entre biomasa total viva y carbono vivo (Kauffman *et al.*, 2011, 2020). Este enfoque simple ofreció una evaluación precisa y rápida de la biomasa de los manglares en la región estudiada.

Para complementar las mediciones de campo, se realizaron vuelos con drones en tres áreas de manglares en la costa norte del departamento de Nariño. Utilizando los modelos DJI Mavic Pro

y Mavic 2 Pro, se adquirieron imágenes aéreas de baja altitud con resoluciones de hasta 2 cm/píxel. Estos registros fueron procesados mediante el software Agisoft Metashape, que permite generar ortomosaicos y modelos digitales de superficie (DSM, por su sigla en inglés).



Los ortomosaicos revelaron la heterogeneidad de la vegetación y la presencia de especies indicativas de degradación del manglar. Los DSM se utilizaron para estimar la altura de los árboles, ajustándolos verticalmente con respecto a las áreas de lodo y arena expuestas durante las mareas bajas. Este enfoque proporcionó una visión detallada y eficaz de la estructura y la salud de los manglares, complementando las mediciones terrestres.

### Comparaciones de datos satelitales en manglares

En la investigación, se contrastaron datos obtenidos *in situ* y mediante drones con dos productos de teledetección globales desarrollados por Simard *et al.* (2019). Estos productos incluyeron la altura máxima del dosel de manglar para el año 2000, derivada de datos satelitales SRTM y LIDAR GLAS, así como un mapa de biomasa de manglar generado mediante alometría y estimaciones SRTM.

Además, se compararon los datos de altura de manglares con un producto de alta resolución (12 × 12 m) de la misión TanDEM-X, aplicando ajustes similares a los DSM de drones. Las alturas de los árboles se evaluaron mediante regresiones lineales con mediciones *in situ*, calculando coeficientes de determinación de Pearson y el RMSE para evaluar la calidad de las regresiones. Este enfoque proporcionó una evaluación detallada y comparativa de las alturas de manglares obtenidas por diferentes métodos.

### Dominio del mangle rojo y la influencia de la ranconcha en el sotobosque

En los sitios estudiados, el mangle rojo (*Rhizophora* spp.) prevaleció. En este sentido se destacó el sitio Madrid (figura 5.2), donde el helecho dorado (*Acrostichum aureum*) dominaba el sotobosque, llegando a alcanzar hasta 4 m de altura. Aunque los drones no captaron completamente esta especie, aproximadamente el 5 % del área en el sitio Madrid estaba cubierto de forma exclusiva por el helecho (figura 5.3).

### Tamaño y biomasa: comparación entre sitios

El sitio Madrid exhibió árboles más grandes con un DBH promedio de 52,4 cm y alturas de hasta 57 m, contrastando con La Rotura y La Punta del Codo, donde el DBH promedio fue alrededor de 20 cm y las alturas máximas llegaron a 50,8 m y 53,6 m, respectivamente. Aunque los valores promedio de biomasa (AGB, por sus siglas en inglés) variaron según la ecuación alométrica utilizada (Chave *et al.*, 2014; Fromard *et al.*, 1998), el AGB total estuvo dominado por los árboles más grandes en todos los sitios. Se estimó que la biomasa terrestre del manglar osciló entre 626,4 y 862,2 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que las existencias de carbono sobre el suelo variaron entre 290,7 y 400,1 Mg C ha<sup>-1</sup>, siendo notables las diferencias con valores anteriores derivados de datos SRTM.

Figura 5.2. Los tres ortomosaicos RGB obtenidos con los datos del dron muestran la ubicación georreferenciada de los árboles medidos en altura mediante el hipsómetro láser Nikon Forestry Pro II. Imagen tomada de Castellanos-Galindo *et al.* (2021)

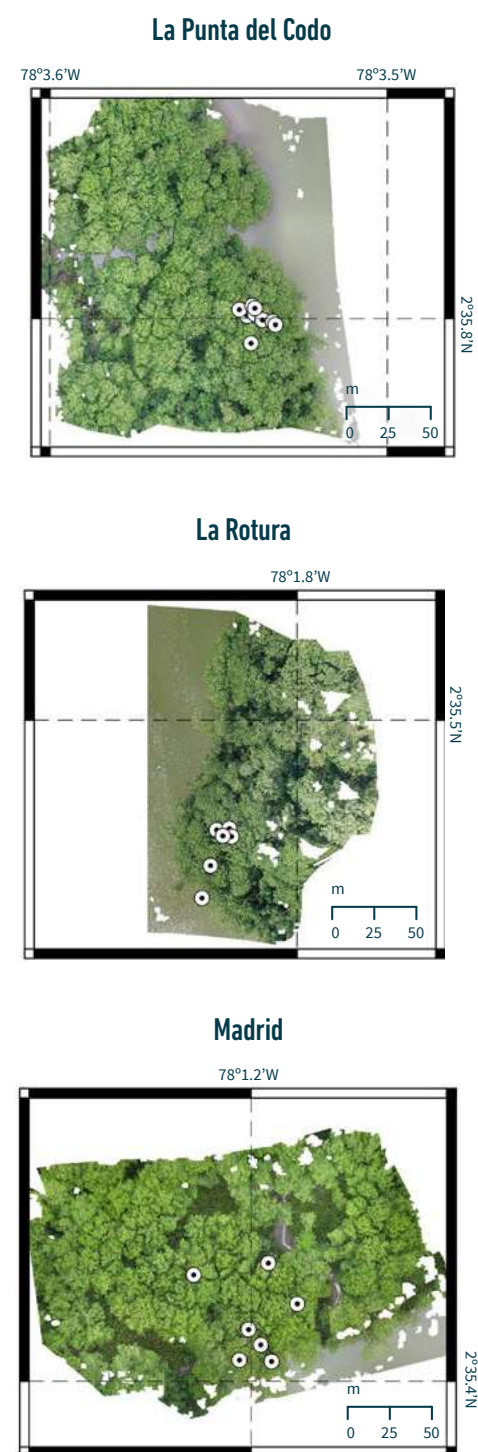


Figura 5.3. Ortomosaico del dron de uno de los sitios de manglares estudiados en Iscuandé, Pacífico colombiano. Las áreas delimitadas de manera transparente en el ortomosaico muestran regiones completamente cubiertas por el helecho dorado *A. aureum*. Las imágenes a la derecha muestran cómo el sotobosque de estas áreas está dominado por *A. aureum*. Imagen tomada de Castellanos-Galindo *et al.* (2021)



### Desafíos y verificaciones en la medición de alturas de manglares

El estudio y trabajo de campo realizado se enfocó en validar y estudiar las regiones con los manglares más altos en las Américas, según lo señalado por Simard *et al.* (2019). Las mediciones de DBH y altura *in situ* fueron esenciales para validar los mapas derivados de drones y SRTM, confirmando hallazgos anteriores y destacando que los manglares más altos alcanzaron los 57 m. Aunque este estudio se centró en ciertas áreas, se demuestra que los datos *in situ*, de drones y sa-

telitales proporcionan resultados precisos en el rango extremo de altura de dosel de manglar.

Sin embargo, cada método utilizado para estimar la altura de los árboles presentó desafíos y errores asociados. Así, aunque se corroboró la existencia de manglares excepcionalmente altos en la región, la precisión varió entre las distintas técnicas. Por lo tanto, se resalta la importancia de considerar estas limitaciones al interpretar los resultados. Las mediciones *in situ*, realizadas con un telémetro láser, se consideran las más confiables, pero se recono-

ce la posibilidad de incertidumbres significativas asociadas con este método.

Referencias adicionales, como el estudio de Saliu *et al.* (2021), respaldan la eficacia del hipsómetro láser, aunque señalan posibles errores, especialmente en bosques tropicales húmedos. La densidad del dosel y las raíces aéreas de los árboles *Rhizophora* complican aún más la identificación precisa del suelo. A pesar de estos desafíos, las mediciones *in situ* continúan siendo esenciales para validar y mejorar la precisión de los datos derivados de drones y satélites en el estudio de la altura de los manglares.

### Estudio de manglares en Iscuandé: desafíos y descubrimientos en la medición de biomasa aérea

Los valores *in situ* de la biomasa aérea de los manglares en Iscuandé destacan por sus altos valores, oscilando entre 626,4 y 862,2 Mg ha<sup>-1</sup> (figura 5.4). Estas cifras se sitúan en el rango superior a nivel mundial, comparables con manglares en Gabón, donde se encuentran árboles de hasta 60 m (Rovai *et al.*, 2021; Trettin *et al.*, 2021).

Aunque superan las estimaciones previas de Simard *et al.* (2019), estos resultados subrayan la necesidad de revisar la relación entre SRTM e inventarios de campo, considerando conjuntos de datos más amplios. Un diseño de muestreo integral que abarque la variabilidad de manglares en la región podría proporcionar estimaciones más precisas de la biomasa y el carbono de estos ecosistemas.

### Ventajas de los datos derivados de drones para detectar la degradación de manglares

En este estudio sobre los manglares de la costa del Pacífico colombiano se emplearon drones para obtener datos detallados, revelando información clave no capturada por mediciones en tierra o productos satelitales convencionales.

Los resultados destacaron la heterogeneidad en las alturas del dosel y la detección de brechas en el dosel, indicativas de posibles áreas degradadas.

Asimismo, se identificó la presencia de la ranconcha *A. aureum*, helecho asociado a la degradación no capturado por productos satelitales. Aunque los manglares aún exhiben un desarrollo saludable, la tala histórica de manglares en la región, que aún continúa, y el desarrollo de posibles proyectos de infraestructura se perfilan como amenazas para estos ecosistemas.

En suma, los productos de drones ofrecieron un enfoque detallado para monitorear cambios (figura 5.5), siendo esenciales para evaluar la salud y la degradación de estos ecosistemas, y sugieren nuevas líneas de investigación para comprender mejor la dinámica de especies como *A. aureum* y los impactos de intervenciones humanas en manglares bien establecidos.

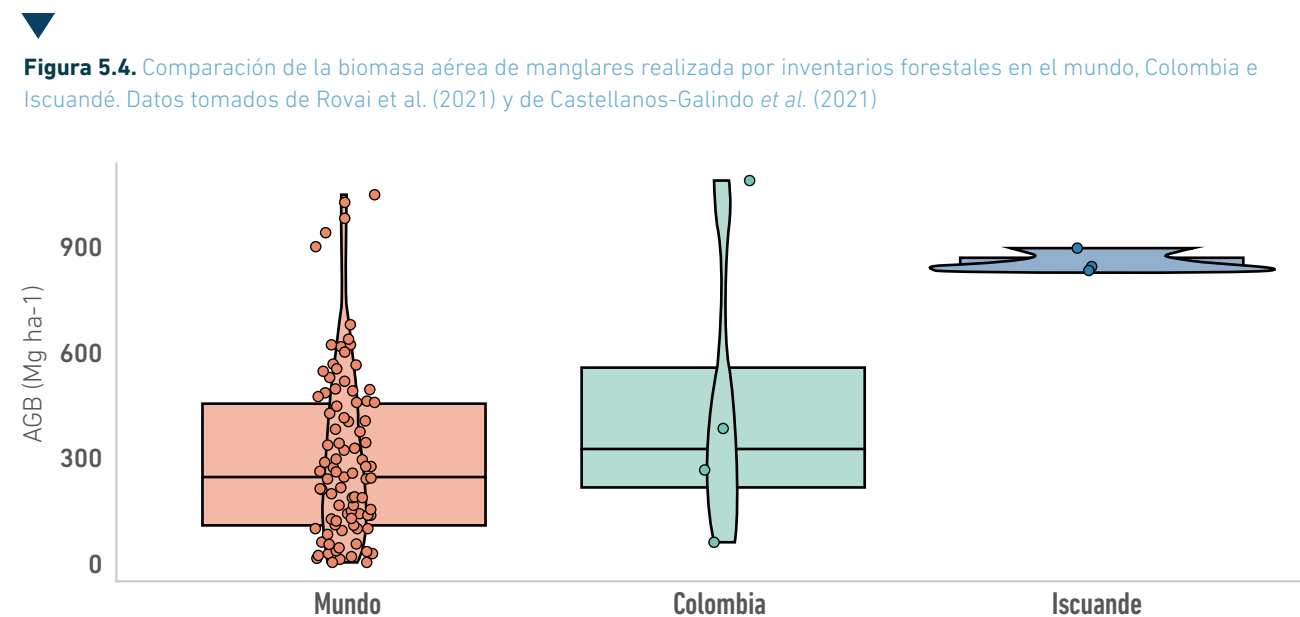
### Navegando los desafíos del carbono azul: metodologías innovadoras para estudiar manglares en zonas remotas con drones

Este estudio sobre los manglares de la costa del Pacífico colombiano destacó desafíos logísticos en la recolección de datos de campo

y drones en estas áreas remotas. La accesibilidad a los sitios implicó una cuidadosa planificación de viajes, colaboración con autoridades locales y un trabajo de campo intenso dentro del lodo y raíces de manglar. A su vez, la colaboración con comunidades locales enriqueció la comprensión de los valores culturales de los manglares.

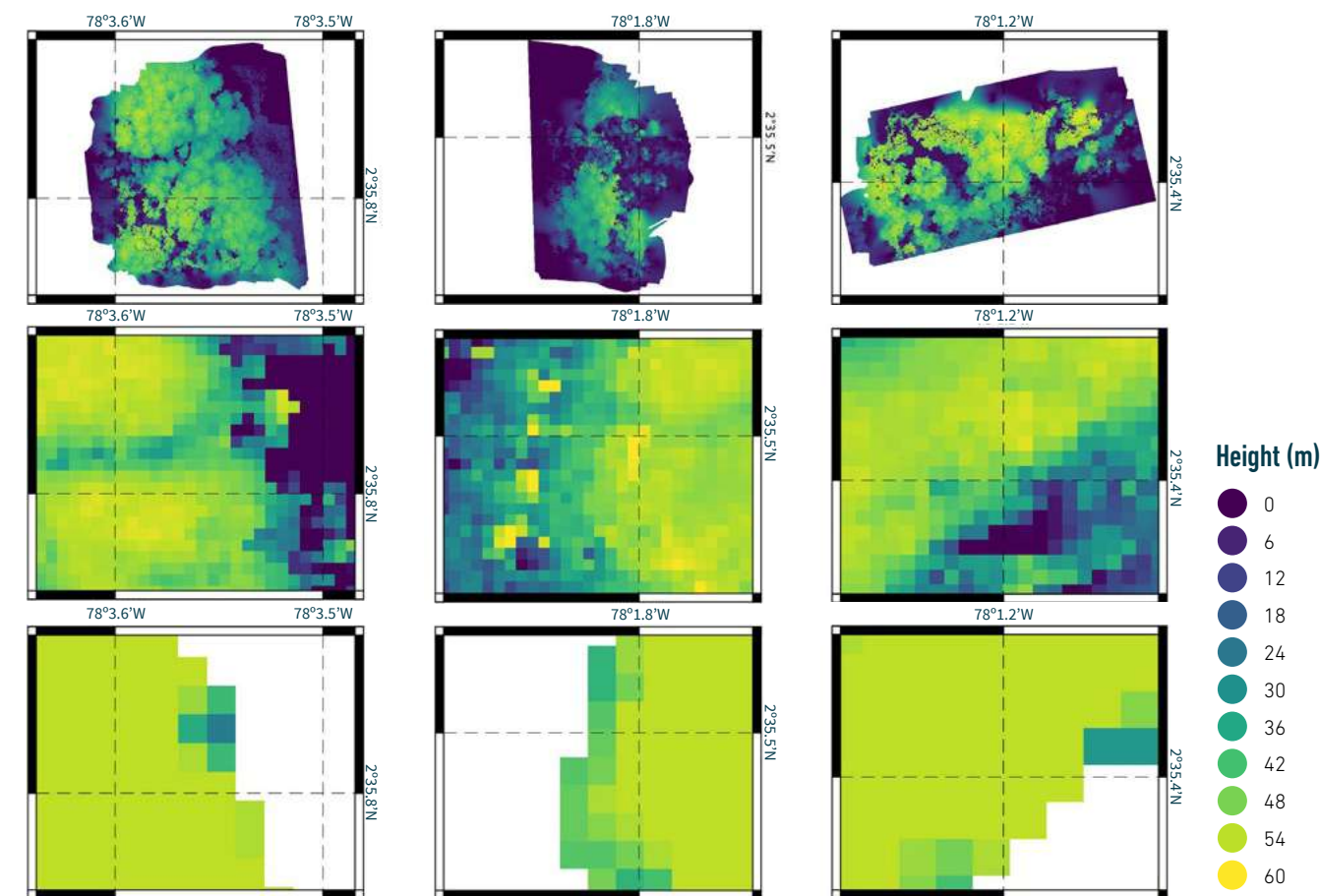
Aunque se identificaron desafíos como la dificultad para recopilar alturas de árboles de manera sistemática en terrenos complejos, los datos de drones ofrecieron una evaluación valiosa de las existencias de carbono, fundamentales para proyectos de carbono azul en esta región. Igualmente, los resultados proporcionaron metodologías de evaluación y una evaluación inicial *in situ* de las existencias de carbono, respaldando futuros proyectos de conservación en un área identificada como un *hotspot* de carbono azul.

Asimismo, la combinación de datos de drones y mediciones de árboles permitió detectar signos de degradación a pequeña escala, ofreciendo una comprensión detallada de los procesos del paisaje en estos ecosistemas vulnerables. De este modo se complementan las evaluaciones más amplias actualmente utilizadas para la cartografía de manglares.



**Figura 5.4.** Comparación de la biomasa aérea de manglares realizada por inventarios forestales en el mundo, Colombia e Iscuandé. Datos tomados de Rovai *et al.* (2021) y de Castellanos-Galindo *et al.* (2021)

**Figura 5.5.** Comparación de productos altimétricos derivados de estudios en manglares de Iscuandé (costa del Pacífico colombiano). Las áreas de manglar corresponden a Punta del Codo, La Rotura y Madrid, de izquierda a derecha. La fila superior muestra los DSM desplazados verticalmente obtenidos de los datos del dron. La fila del medio representa las alturas del dosel del producto TanDEM-X (inédito de Simard; © DLR 2020). La fila inferior corresponde a las alturas del dosel del conjunto de datos de Simard *et al.* (2019). Imagen tomada de Castellanos-Galindo *et al.* (2021)



# Diversidad, abundancia y distribución del ictioplancton y su relación con las condiciones oceanográficas y los períodos mareales

Christian Bermúdez-Rivas<sup>1</sup>, Jesús Reyes<sup>1</sup>, Andrés Cuéllar<sup>2</sup>, Humberto Quintana<sup>1</sup>, Alan Giraldo<sup>3</sup>, Yadi Moreno<sup>1</sup>, Fredy Castrillón<sup>1</sup>, Juan José Gallego Zerrato<sup>3</sup>, Julio César Herrera Carmona<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Área de Protección del Medio Marino – Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico; <sup>2</sup> Parques Nacionales Naturales de Colombia – Dirección Territorial Pacífico; <sup>3</sup> Universidad del Valle

## El pulso del tiempo y la vida en Sanquianga

Los deltas y los estuarios son zonas de transición entre agua dulce y salada en los que se forman ecosistemas únicos influenciados por la interacción entre corrientes fluviales y mareas (Dirisu, 2019). En la subregión Sanquianga-Gorgona, el delta del río Patía es el más grande del Pacífico colombiano, abarcando 1700 km<sup>2</sup> y presentando un ciclo de mareas semidiurno con un rango de 2 m (Restrepo, 2012). Este delta aporta alrededor de 972 toneladas de sedimentos por kilómetro cua-

drado al año y alberga uno de los mayores bosques de manglar del Pacífico, esencial para la biodiversidad y los recursos pesqueros (Beltrán-León y Morales Osorio, 2021).

El plancton, fundamental en la transferencia de energía y carbono en ecosistemas marinos, es clave en la red trófica. Aunque existen estudios que relacionan la diversidad y productividad del plancton (fitoplancton y zooplancton) con factores ambientales y actividades humanas (Chang *et al.*, 2023), la relación específica entre los ciclos de marea y la diversidad del

plancton ha sido menos explorada dada la complejidad de obtener datos consistentes con alta resolución taxonómica (Dirisu, 2019). La productividad del fitoplancton



▲ Puntos de muestreo efectivos del proyecto

se vincula a cambios mareales que afectan la distribución de nutrientes y, por ende, la abundancia de zooplancton (Ali *et al.*, 2011; Borkman y Smayda, 2009).

Comprender la biodiversidad es crucial para evaluar la salud de los ecosistemas y diferenciar entre variaciones naturales y perturbaciones humanas (Chang *et al.*, 2023). Cambios en la diversidad entre fitoplancton y zooplancton pueden deberse tanto a interacciones ecológicas como a factores ambientales independientes. La covariación positiva de biodiversidad entre grupos taxonómicos, a menudo influenciada por factores como la disponibilidad de agua, energía y temperatura, ha sido estudiada en varios contextos, pero aún no se ha probado ampliamente en todos los ambientes (Toranza y Arim, 2010).

Este estudio examina las condiciones oceanográficas en Sanquianga-Gorgona durante pleamar y bajamar en el delta del río Sanquianga, así como su relación con la diversidad y abundancia del plancton, enfocándose en el ictioplancton. A través de enfoques multidisciplinarios y colaborativos, esta investigación proporciona una ventana para entender los patrones y procesos que dan forma a la vida marina en esta región única del Pacífico colombiano.

## Explorando la dinámica de la vida en el océano

Durante la fase de campo de la ECP2021-I se llevaron a cabo muestreos exhaustivos en 18 estaciones distribuidas en tres áreas clave: las bocananas de Guascama, Sanquianga y Amarales (Figura 6.1). Los científicos recolectaron muestras tanto en marea alta como en la baja, considerando cómo estos cambios en las mareas y la ubicación de las estaciones —desde la costa hasta el océano— influyen en la dinámica de estos ecosistemas.

En cada punto de muestreo se midieron características como la transparencia del agua, temperatura, salinidad, densidad y oxígeno disuelto. También se tomaron muestras de agua superficial y se analizaron en el laboratorio a bordo para evaluar

parámetros como salinidad, pH, nutrientes, y oxígeno disuelto. La diversidad del plancton, un componente vital de estos ecosistemas, se analizó mediante la recolección de muestras con redes especializadas y su posterior estudio en laboratorio. Para determinar la calidad del agua y su nivel de productividad biológica, se utilizó el índice de estado trófico (TSI), determinado por la transparencia medida con un disco Secchi.



◀ Chaetoceros diversus

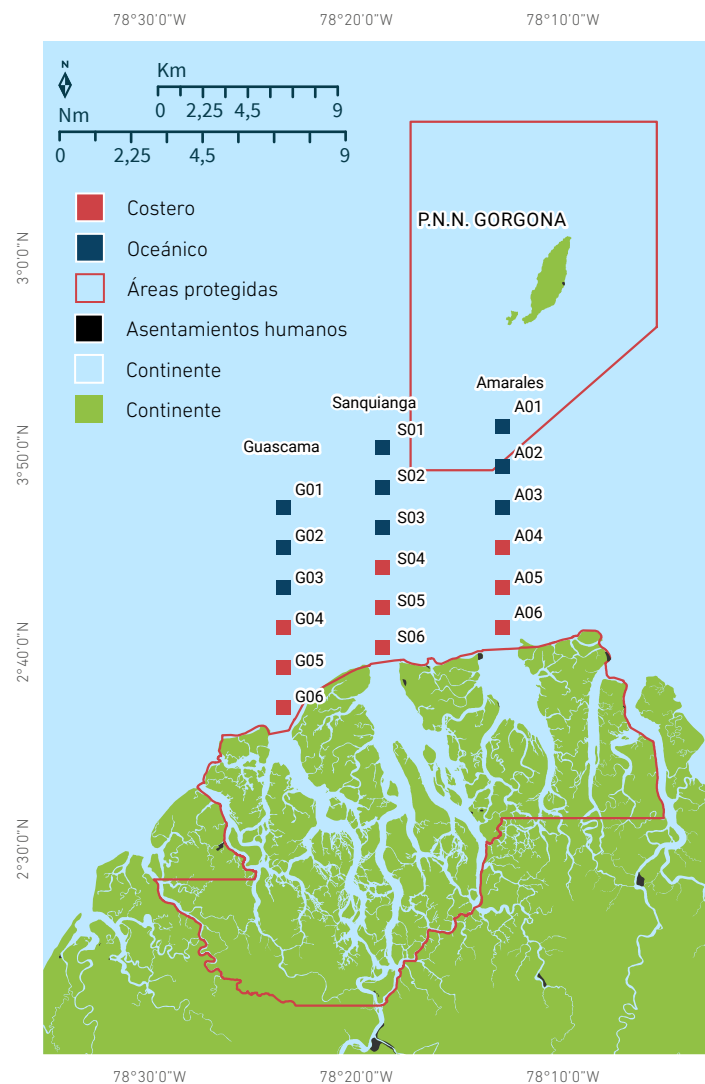
### Desentrañando patrones

En el laboratorio, las muestras de agua se sometieron a un análisis detallado para medir nutrientes y otros indicadores clave de la salud del ecosistema, siguiendo estándares reconocidos a nivel internacional. El fitoplancton, crucial para la red alimentaria marina, fue cuantificado y clasificado utilizando técnicas de microscopía de luz y bases de datos taxonómicas actualizadas (Guiry *et al.*, 2022). La diversidad del ictioplancton, el plancton que representa la fase temprana de los peces, fue evaluada en colaboración con el equipo técnico de Parques Nacionales Naturales y de la Universidad del Valle.

Para comprender las relaciones entre las variables ambientales y la biodiversidad, los datos recopilados se clasificaron y analizaron cuidadosamente. Se compararon los perfiles de temperatura, salinidad y densidad en diferentes condiciones de marea y ubicaciones. Igualmente, mediante técnicas estadísticas de ordenación como el análisis de componentes principales (PCA), se simplificó la interpretación de los datos y se revelaron patrones significativos en la distribución del plancton y otras variables ambientales (Kassambara y Mundt, 2020).

A través de métodos multivariados, se identificaron diferencias en la biodiversidad entre distintas áreas y condiciones ambientales. El análisis de escalamiento multidimensional no métrico (nDMS) y la prueba de

**Figura 6.1.** Área de estudio subregión Sanquianga-Gorgona. Estaciones de muestreo, transectos y sectores identificados en la región.



Mantel ayudaron además a explorar cómo las características hidrográficas influyen en la distribución de especies (Oksanen *et al.*, 2022). Finalmente, para fomentar la transparencia y la colaboración científica, los *scripts* y métodos de análisis se hicieron públicos en un repositorio de GitHub disponible para todos los interesados en explorar más a fondo estos datos.

### Un retrato de las profundidades

El análisis de las variables fisicoquímicas del agua, como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad, reveló una dinámica compleja en la región del delta del río Sanquianga. Aunque las mediciones iniciales no mostraron diferencias significativas entre los transectos Amarales,

Guascama y Sanquianga (Figura 6.1), un análisis estadístico más detallado demostró que había variaciones importantes en las condiciones ambientales entre estos transectos. Por ejemplo, la salinidad y el oxígeno disuelto variaron significativamente en algunos transectos, lo que sugiere que factores como la geografía y las corrientes marinas influyen en la dinámica del agua.

### Dos mundos distintos

Las diferencias claras entre los sectores costeros y oceánicos reflejan que cada uno podría considerarse como una unidad ambiental distinta. Los valores de variables como la temperatura, la salinidad, el oxígeno

disuelto y la densidad mostraron comportamientos diferentes en ambas áreas, confirmando que la variación en las condiciones del agua no es aleatoria. Esto destaca la complejidad de los ecosistemas en transición entre la costa y el océano.

### El pulso de las mareas

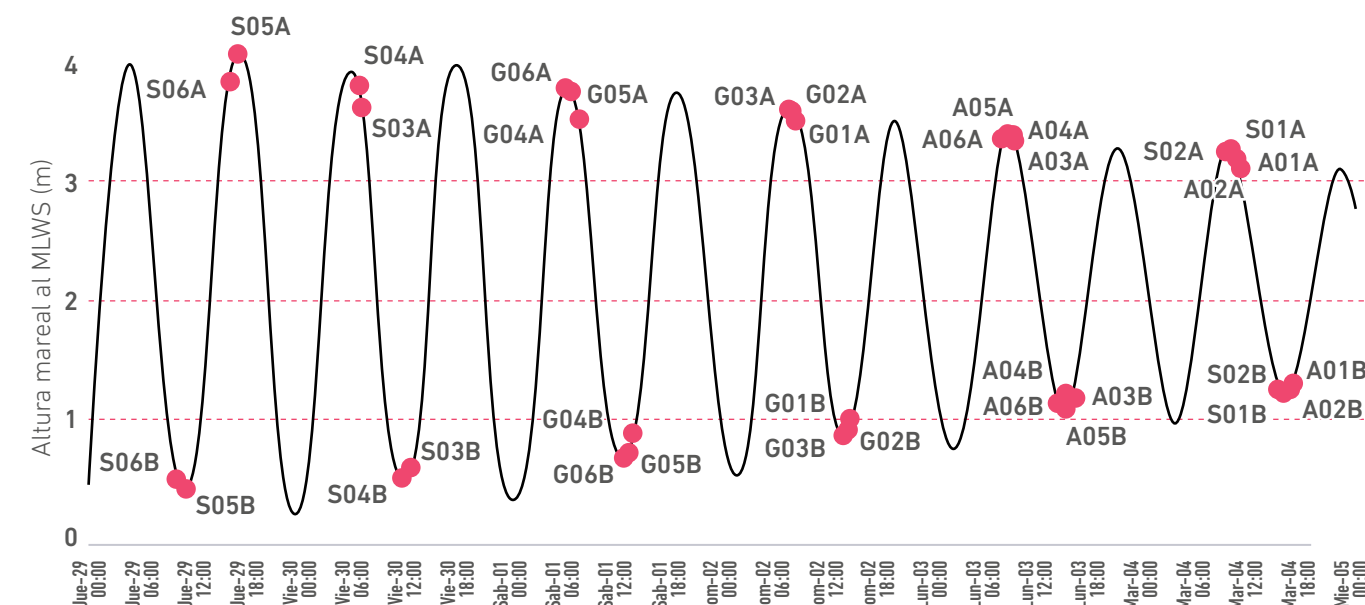
La dinámica de las mareas también desempeñó un papel crucial en la variabilidad ambiental. Por una parte, se encontraron diferencias significativas en la temperatura entre marea alta y baja, aunque, por otra parte, variables como la salinidad y el oxígeno disuelto no mostraron cambios notables. Este comportamiento indica que las mareas afectan ciertas características del agua

más que otras, subrayando la complejidad de los procesos oceanográficos en la región (Figura 6.2).

### Los ingredientes clave del océano

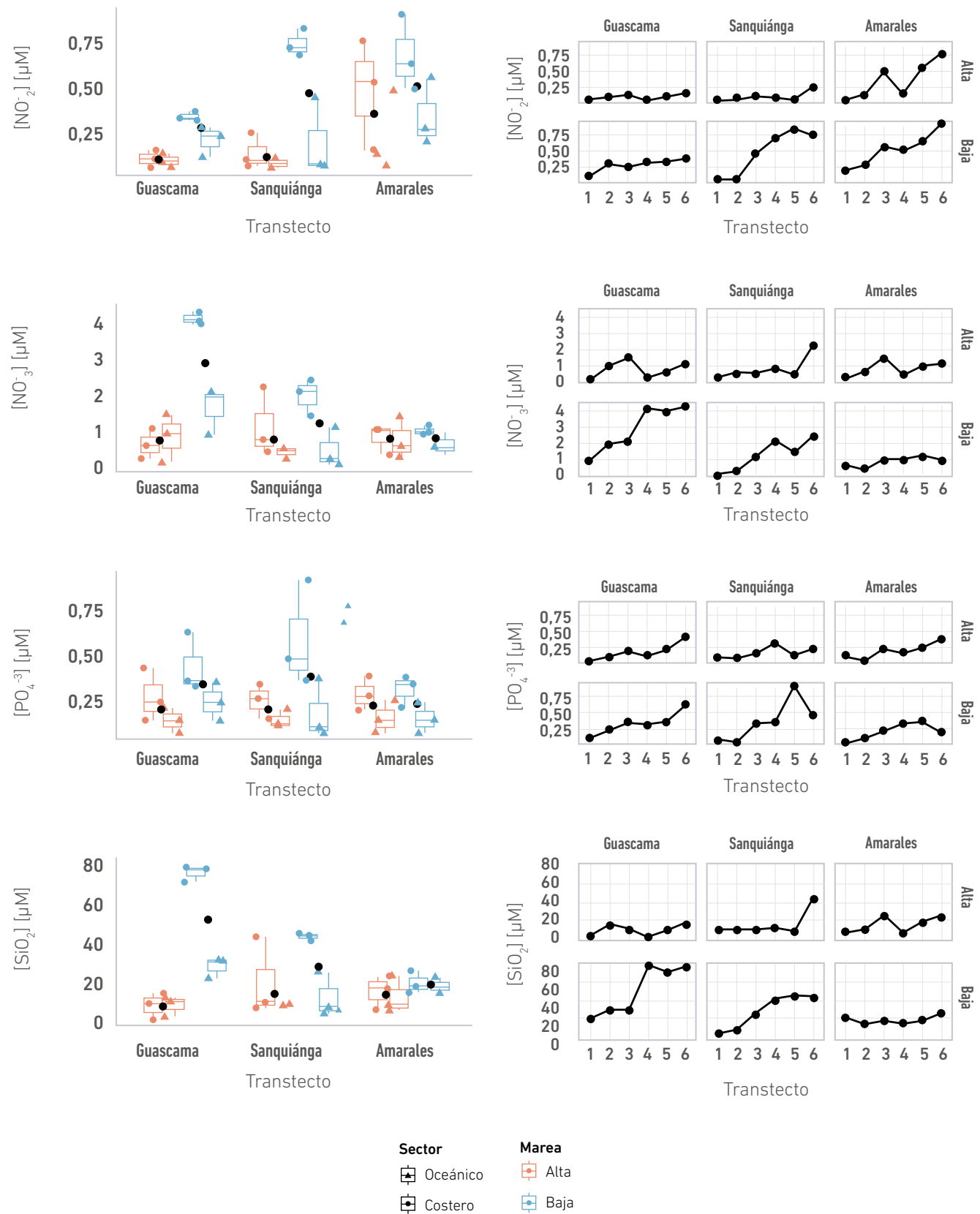
Las concentraciones de nutrientes, como nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos, variaron significativamente entre los diferentes transectos y períodos mareales. Las bocanas, especialmente durante la marea baja, registraron las concentraciones más altas de estos nutrientes, mostrando una correlación espacial significativa (I de Moran,  $p < 0,01$ ) (Figuras 6.3). Este patrón sugiere que las zonas cercanas a la costa pueden experimentar mayor turbidez, afectando la penetración de luz y la vida marina.

**Figura 6.2.** Comportamiento de la onda mareal durante la colecta de las muestras. Del 28 de abril al 7 de mayo del 2021.





**Figura 6.3.** Diagrama de cajas y líneas que muestra la distribución de las concentraciones de nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquiánga.



### Diversidad del fitoplancton y el ictioplancton: un ecosistema complejo y rico

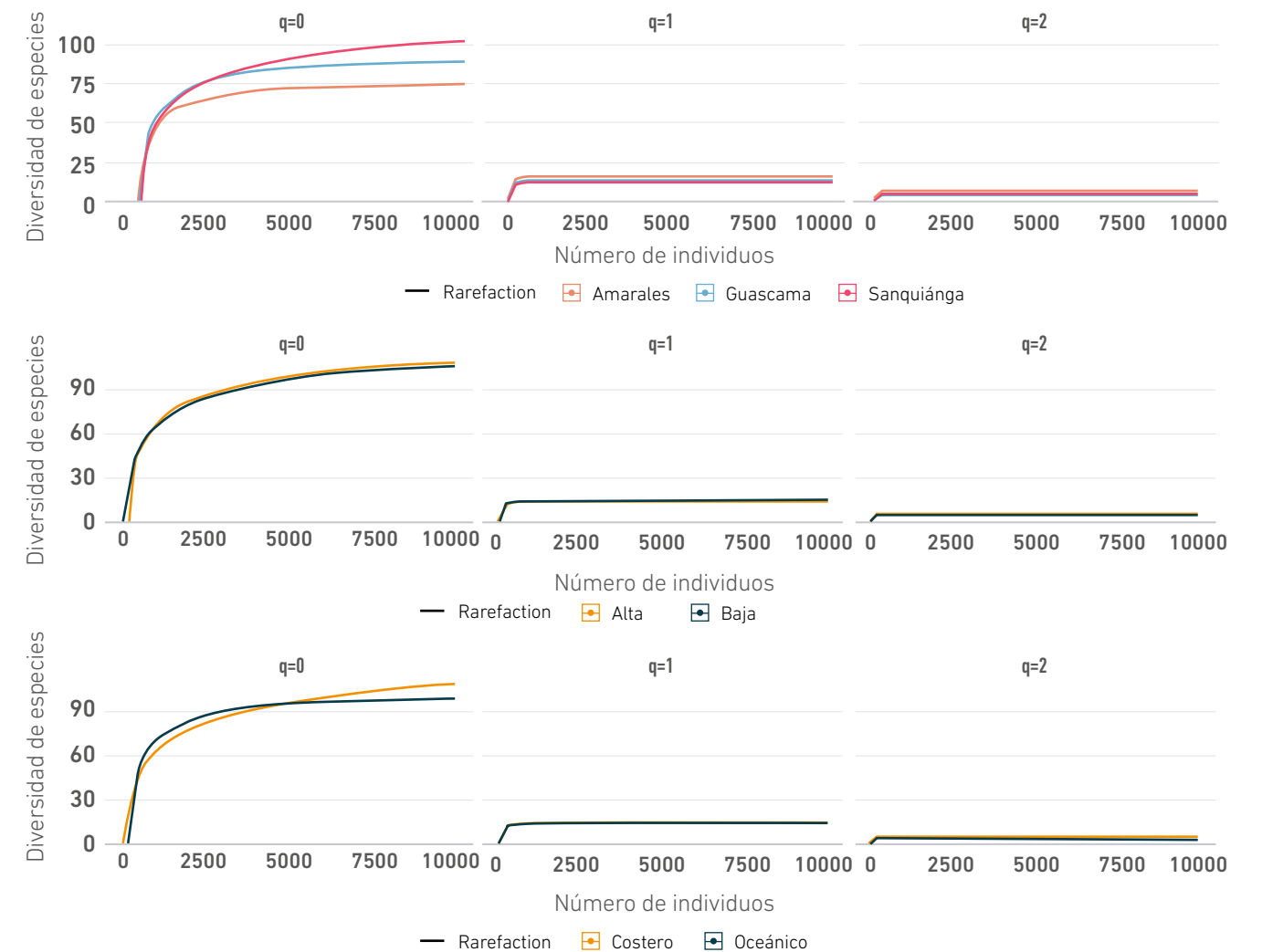
Se identificaron 150 especies de fitoplancton, principalmente de las clases Bacillariophyceae y Dinophyceae. Aunque las medidas de diversidad ( $^0\text{D}$ ,  $^1\text{D}$ , y  $^2\text{D}$ ) no mostraron diferencias significativas entre los transectos o períodos mareales, sí hubo variaciones entre los sectores costero y oceánico (Figura 6.4). La densidad celular del fitoplancton y la clorofila *a*, indicadores clave

de la productividad, presentaron patrones de distribución influenciados por las mareas y la ubicación. En marea baja, las concentraciones de clorofila *a* fueron más altas en las zonas costeras, destacando la influencia de los nutrientes locales y las dinámicas mareales (Figura 6.4).

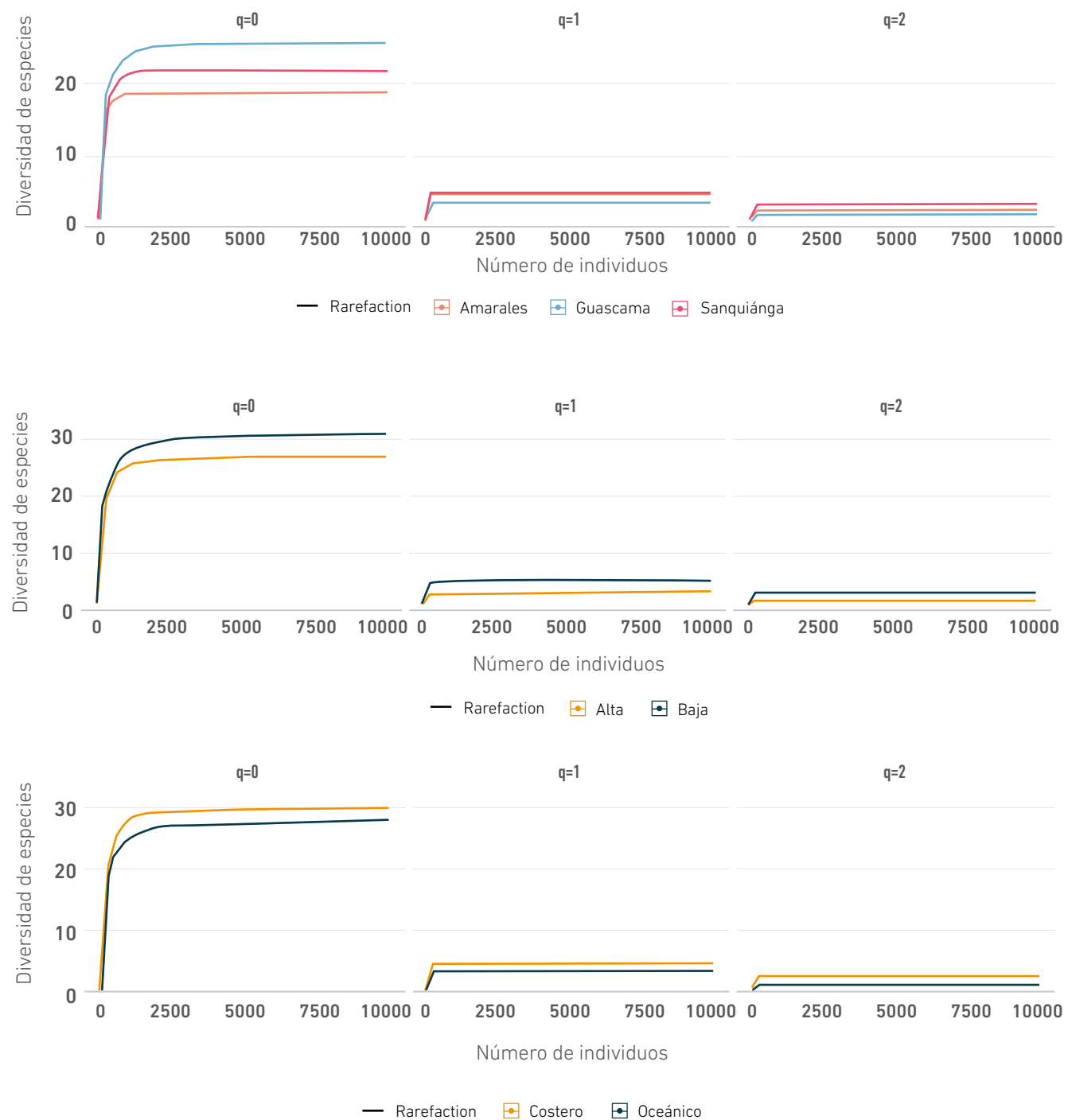
El análisis del ictioplancton en el delta del río Sanquiánga identificó 33 especies distribuidas en 13 familias, entre las cuales Scianidae, Engraulidae, Scombridae y Gobiidae fueron las más

diversas. La riqueza de especies ( $^0\text{D}$ ) fue más alta en el transecto de Amarales durante la marea baja, mientras que la diversidad de especies comunes ( $^1\text{D}$ ) y la diversidad que considera equitatividad ( $^2\text{D}$ ) también reflejaron variaciones notables. La densidad del ictioplancton mostró patrones espaciales claros, especialmente en el transecto de Guascama, indicando una fuerte dependencia de las características del entorno y la dinámica del hábitat (Figura 6.5).

**Figura 6.4.** Estimación y extrapolación de la diversidad  $^0\text{D}$ ,  $^1\text{D}$  y  $^2\text{D}$  del fitoplancton, en los transectos, períodos mareales y sectores en el delta del río Sanquiánga.



**Figura 6.5.** Estimación y extrapolación de la diversidad  $^0D$ ,  $^1D$  y  $^2D$  del ictioplancton, en los transectos, períodos mareales y sectores en el delta del río Sanquiánga.



La presencia destacada de familias como Scianidae y Engraulidae, que incluyen especies de

importancia comercial y ecológica, subraya la importancia del delta de Sanquiánga como área crítica

para la conservación de la biodiversidad marina y la gestión sostenible de los recursos pesqueros.

### Interacciones complejas del ambiente y la productividad

El estudio del plancton en el delta del río Sanquiánga mostró que las variables ambientales y la estructura del hábitat influyen significativamente en la distribución y diversidad de las comunidades acuáticas. La compleja red de bocanas, junto con la interacción entre los sectores costero y oceánico, crea un entorno único donde las concentraciones de nutrientes como nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos son factores clave que afectan la densidad y diversidad del fitoplancton e ictioplancton. En particular, las áreas con alta concentración de nutrientes, especialmente durante la marea baja, presentan mayores niveles de clorofila *a*, un indicador de la productividad del fitoplancton, lo que sugiere que el aporte de nutrientes del río favorece el crecimiento de estas comunidades.

El fitoplancton mostró una estrecha relación con la disponibilidad de nutrientes y la transparencia del agua, con un aumento en su densidad en áreas eutróficas durante la marea baja, resultado de la mezcla de aguas dulces y salinas. En contraste, el ictioplancton exhibió una mayor sensibilidad a la estructura espacial del hábitat, con una riqueza y una densidad de especies influenciadas por características locales específicas, como la disponibilidad de refugios y recursos alimenticios en ciertas bocanas,

como la de Guascama. Esto indica que, aunque ambos grupos están influenciados por factores ambientales, responden de manera diferente a las condiciones locales.

A pesar de estas variaciones locales en la riqueza y la densidad de especies, el análisis de escalamiento multidimensional no mostró agrupamientos claros en la composición de especies de fitoplancton e ictioplancton, lo que sugiere una comunidad planctónica homogénea en Sanquiánga. Esto resalta que, aunque las condiciones ambientales cambian entre sectores y mareas, la estructura comunitaria general del plancton se mantiene relativamente constante, adaptándose a diferentes condiciones y subrayando la necesidad de preservar estos ecosistemas equilibrados para mantener la biodiversidad y los procesos ecológicos vitales.

### Un ecosistema interconectado y dinámico

Los resultados subrayan la importancia de comprender cómo las variables ambientales y las estructuras espaciales influyen en la biodiversidad del plancton en ecosistemas como el delta del Sanquiánga.

La «paradoja del plancton» se manifiesta en la coexistencia de una alta diversidad de especies facilitada por la abundancia de recursos y la variabilidad ambiental (Benincà *et al.*, 2008). La predominancia de diatomeas, favorecida por las altas concentraciones de silicio, resalta cómo los factores químicos pueden modelar la estructura de las comunidades (Egge y Aksnes, 1992).

En conjunto, estos hallazgos sugieren que tanto el fitoplancton como el ictioplancton son moldeados por complejas interacciones entre factores ambientales y la estructura espacial del hábitat. A pesar de las diferencias locales en la riqueza y distribución de especies, la composición general del plancton permanece relativamente constante, reflejando un equilibrio dinámico en este ecosistema estuarino.



# Análisis de la dinámica espacio-temporal del bosque de manglar

Nelson Nieto, Mónica González, Carlos Franco Prieto, Diana Salazar, Pedro Karin Serrato

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Dirección de Investigación y Prospectiva

## El latido verde del Pacífico

Los bosques de manglar, aunque ocupan sólo una fracción de la superficie mundial, son ecosistemas estratégicos e irremplazables que brindan servicios esenciales para la vida en la Tierra. Proveen hábitat para una gran diversidad de especies, sirven como soporte para redes alimenticias terrestres y marinas, suministran productos forestales y alimentos mediante recursos pesqueros, y actúan como barreras naturales que protegen las zonas costeras frente a tormentas y fluctuaciones del nivel del mar (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar], 2019; Parques Nacionales Naturales de Colombia [PNN], 2017). Además, los manglares son sumideros de carbono altamente eficaces, con una capacidad de captura de CO<sub>2</sub> que supera a la de muchos otros ecosistemas, albergando el doble de biomasa viva que los bosques tropicales en general (Spalding, 2013).

A pesar de su importancia, los manglares se encuentran entre los ecosistemas más amenazados del planeta. En los últimos 40 años, la cobertura global de los manglares ha disminuido a la mitad debido a la intervención humana (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [Unesco], 2024). UNESCO 2024). Esta alarmante tasa de pérdida, que es entre tres y cinco veces más rápida que la de otros bosques, ha llevado a países como Colombia a intensificar sus esfuerzos para proteger estos valiosos ecosistemas.

Uno de los mayores desafíos en la conservación de los manglares radica en las dificultades que representa el monitoreo de estos ecosistemas, por lo cual en muchos casos no se cuenta con datos precisos sobre su extensión y, por tanto, sobre las tasas de recuperación o pérdida. A pesar de los esfuerzos por estandarizar los métodos de monitoreo y reporte, aún existen discrepancias importantes que dificultan hacer



▲ Puntos de muestreo efectivos del proyecto

seguimiento a las medidas de uso sostenible y protección. En este contexto, las tecnologías de monitoreo remoto, como el uso de imágenes satelitales, ofrecen una oportunidad prometedora para obtener información más precisa y actualizada. Estas herramientas permiten mapear grandes extensiones de terreno y analizar cambios en la cobertura vegetal con alta resolución, facilitando así una respuesta más rápida y efectiva a las amenazas que enfrentan los manglares.

En el Parque Nacional Natural Sanquianga Territorio Ancestral y Colectivo (PNN Sanquianga), los manglares cubren el 80% del área protegida, con una extensión total de 64000 hectáreas, y son uno de los bosques de manglar más desarrollados de la región, con individuos que superan los 50 m de altura y cinco especies de manglar reportadas (Castellanos-Galindo *et al.*, 2021; PNN, 2017). Esta área protegida es un refugio de biodiversidad y un laboratorio natural para

estudiar la dinámica espacio-temporal de estos ecosistemas.

Este proyecto responde a la necesidad de comprender la estructura y dinámica de los manglares mediante el uso de imágenes de radar y ópticas, aplicando técnicas de preprocesamiento para optimizar su análisis.

## Explorando el manglar desde los cielos

La percepción remota utiliza tecnologías como satélites y aeronaves para observar la Tierra sin contacto directo. Los sensores captan la energía reflejada, emitida o transmitida desde la superficie, permitiendo analizar el suelo, la atmósfera y los océanos. Existen dos tipos principales de sensores: ópticos y de radar. Los primeros captan la luz visible y otras bandas del espectro electromagnético para generar imágenes, pero son sensibles a las condiciones atmosféricas. En cambio, los segundos funcionan con microondas, lo que les permite capturar imágenes en casi cualquier clima y momento del día, pues no dependen de la luz solar.

En este estudio, se emplearon imágenes satelitales de los programas Sentinel 1 (radar), Sentinel 2 y Planet Scope, que proporcionan resoluciones espaciales de 10 m (Sentinel) y 4,77 m (Planet) y permitieron un análisis detallado del área de estudio. Para el procesamiento de estos registros, se aplicó una metodología desarrollada por el Instituto Geográfico

Agustín Codazzi (IGAC, 2021), basada en técnicas de preprocesamiento y algoritmos de reducción de ruido multitemporales. Gracias a este enfoque se pudieron destacar las coberturas de manglar frente a otras coberturas del área, mejorando así la precisión del estudio.

## Capturando las huellas de la luz

Complementando los sensores remotos, la espectroradiometría se utilizó para medir la reflectividad de la vegetación y otros materiales en condiciones naturales, lo que ayuda a calibrar los datos satelitales. Para ello, se emplearon firmas espectrales, perfiles únicos que describen cómo las superficies reflejan la luz en diferentes longitudes de onda. Estas firmas fueron tomadas durante la fase de campo de la ECP2021-I, con el fin de detectar los distintos tipos de coberturas de interés, con especial énfasis en las especies de mangle.

El trabajo de campo para recolectar firmas espectrales se basó en el protocolo del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación del CIAF, actualmente Dirección de Investigación y Prospectiva del IGAC. Esta labor contó con la articulación de los Consejos Comunitarios de la Comunidad Negra del Esquema de Manejo Conjunto del área protegida (Figura 7.1). Se visitaron diez estaciones de monitoreo, donde se capturaron 94 firmas espectrales de coberturas como manglar, agua y arena, ajustándose a las condiciones locales. Posteriormente, estas firmas se procesaron para obtener una firma espectral promedio por tipo de cobertura, eliminando el ruido aleatorio y asegurando la calidad mediante comparaciones con patrones espectrales conocidos. Esta información fue utilizada para crear librerías espectrales detalladas (Figura 7.2). En total se capturaron 64 firmas espectrales de diferentes especies de mangle.

▶ Figura 7.1. Zona de estudio



Parque Nacional Natural Sanquianga

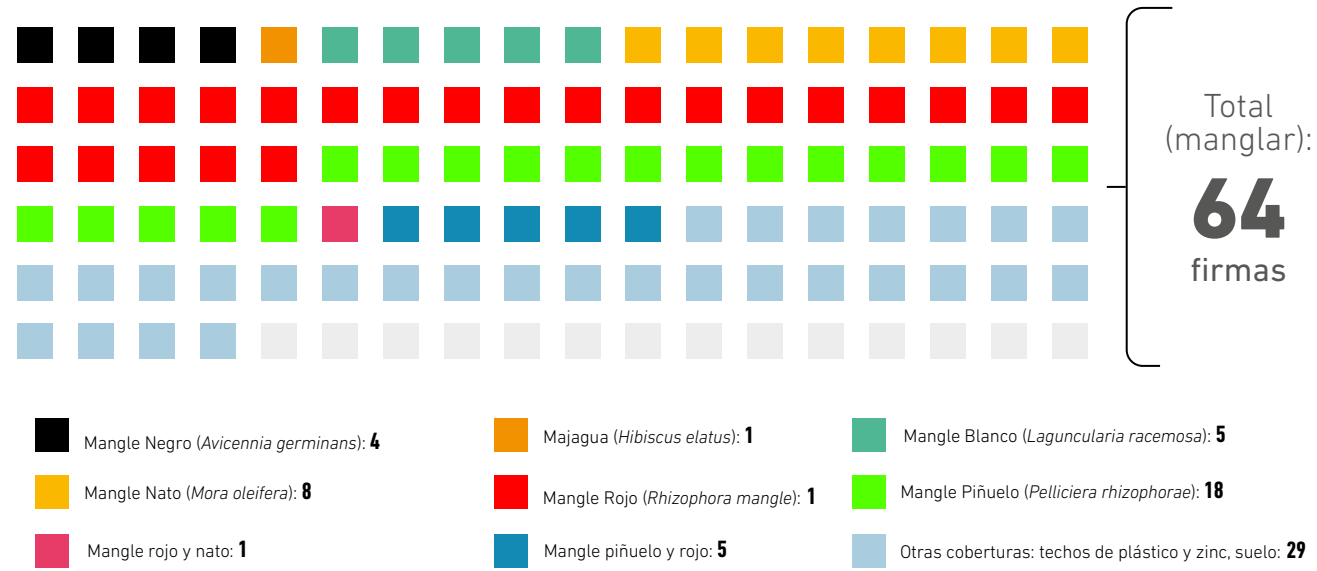
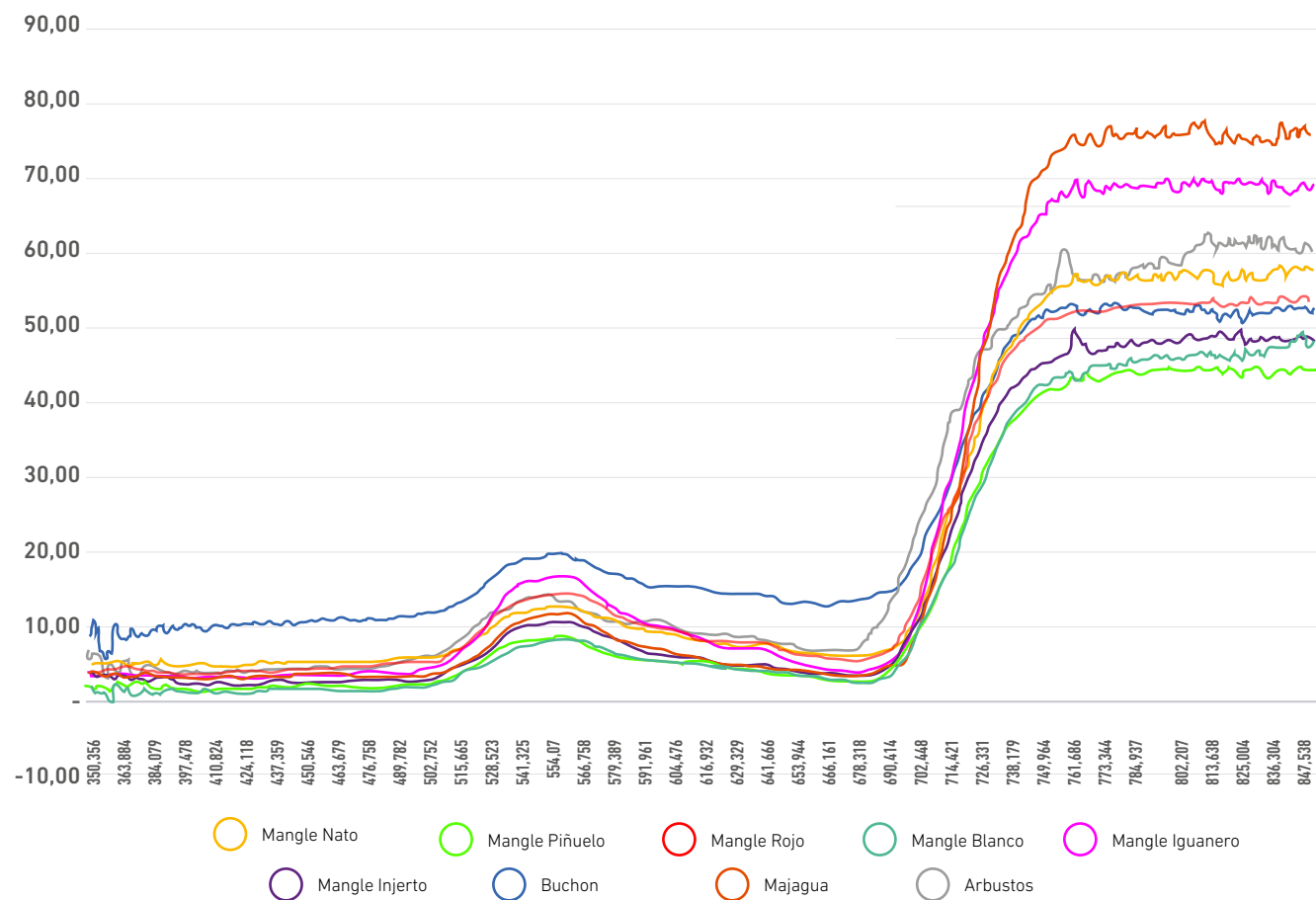


Figura 7.2. Firmas espectrales tipo



Mapeando los latidos del manglar

Para analizar los cambios en el tiempo del bosque de manglar en el PNN Sanquianga, se utilizaron imágenes satelitales de radar Sentinel 1 de los años 2017, 2019 y 2021. Estas capturas fueron procesadas para reducir el ruido visual y facilitar la identificación de cambios en la cobertura del manglar, y se evitó el uso de técnicas que podrían distorsionar los resultados en áreas donde la vegetación cambia mucho. Este enfoque permitió detectar cambios sutiles en el manglar, principalmente debido a factores naturales como las mareas y lluvias, y a prácticas de tala selectiva por parte de las comunidades locales.

Las imágenes procesadas se combinaron en un mapa de colores para mostrar los cambios a lo largo del tiempo: rojo para 2017, verde para 2019 y azul para 2021 (Figura 7.3). Esto ayudó a identificar zonas donde ocurrieron cambios, como el aumento de la erosión en áreas costeras y modificaciones en los márgenes

Figura 7.3. Cambio del bosque de manglar en imágenes de radar

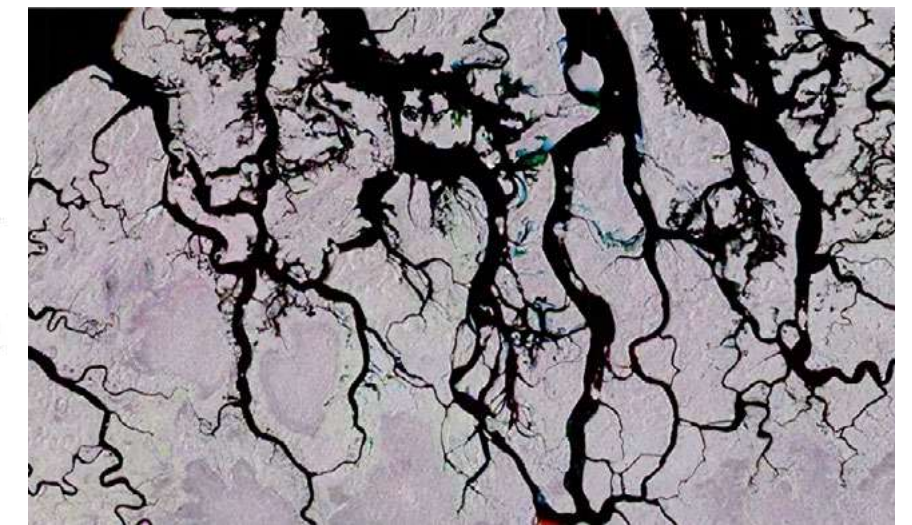


Figura 7.4. Zonas de cambio identificadas



de los cuerpos de agua. Para este estudio, el análisis realizado permitió identificar 12 ha con cambios entre 2019 y 2021 (Figura 7.4), lo que sugiere que el PNN Sanquianga presenta un buen estado de conservación, sin zonas de deforestación importan-

tes. El difícil acceso, la baja presencia antrópica y los acuerdos de manejo del área posiblemente han contribuido a que la transformación del ecosistema sea muy baja, a diferencia de manglares en otras regiones del país donde las presiones son más altas.

### Luces y sombras: revelando el manglar

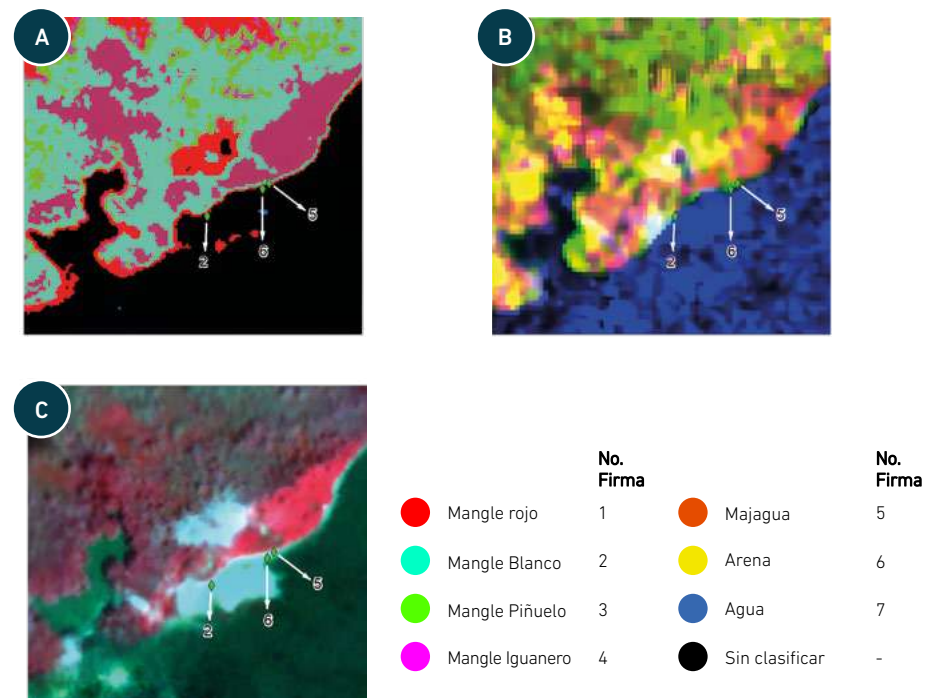
Además, se utilizaron datos de campo para mejorar la precisión del análisis. Se empleó una técnica llamada SAM (mapeo de ángulo espectral) para comparar y contrastar los datos de las firmas espectrales con las imágenes ópticas de satélite del programa PlanetScope. De esta forma se pudieron identificar y clasificar diferentes especies de manglar y otros tipos de cobertura como arena y agua, basándose en las librerías generadas con los datos obtenidos durante la fase de campo. Para el análisis, se seleccionaron las firmas más representativas de las especies de manglar y elementos presentes en el área, lo que dio como resultado un primer mapa de clasificación de coberturas de especies de manglar a partir de firmas espectrales e imágenes ópticas (Figura 7.5).

Los resultados mostraron que la clasificación de las especies de manglar como mangle rojo y blanco correspondía bien con lo observado en campo (Figuras 7.6-7.8). Sin embargo, la precisión puede verse afectada cuando varias especies están muy cerca entre sí, lo que sugiere la necesidad de mejorar el muestreo en futuras investigaciones. Lejos de ser un resultado final, este mapa evidencia el potencial de estas tecnologías para el monitoreo de grandes extensiones de bosques de manglar y representa una invitación para fortalecer la toma de datos de firmas espectrales.



Figura 7.5. Resultado de ejercicios de clasificación con firmas espectrales

Figura 7.6. Acercamiento a los resultados de clasificación (ejemplo 1)



### Un posible mapa vivo del manglar

Esta investigación permitió conocer de primera mano las características biofísicas del área y recolectar datos espectrales clave de las principales coberturas del PNN Sanquianga. Las condiciones particulares del bosque de manglar, como su difícil accesibilidad, presentaron desafíos significativos para la recolección de datos de alta calidad, confirmando la complejidad de trabajar en estos ecosistemas únicos. A pesar de estos retos, se lograron capturar firmas espectrales de varias especies de manglar, incluyendo nato, piñuelo, rojo, blanco, iguanero e injerto, gracias a la participa-

ción de los sabedores tradicionales de las comunidades locales en el proyecto.

Las similitudes en las firmas espectrales reflejan la influencia de factores como la ubicación, las características hidrológicas y las condiciones climáticas en el momento de la toma. Estas firmas son valiosas para la identificación y caracterización de coberturas utilizando imágenes de sensores ópticos, como las de PlanetScope, que, a pesar de la alta nubosidad en la región del Pacífico, ofrecen detalles importantes para la planificación territorial.

En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de imágenes de radar, ópticas y da-

tos de campo de firmas espectrales es una metodología efectiva para estudiar los cambios en el manglar y, potencialmente, identificar las coberturas de diferentes especies. Sin embargo, para mejorar la precisión y optimizar este proceso, es esencial contar con datos de campo más detallados y esfuerzos de muestreo sistemáticos y más amplios. Además, disponer de imágenes ópticas con mayor resolución espectral y espacial permitiría obtener mapas más precisos de la distribución de especies. El uso de drones o sensores de baja altitud podría superar algunas limitaciones actuales, mejorando así la gestión y conservación de estos ecosistemas vitales.

Figura 7.7. Acercamiento a los resultados de clasificación (ejemplo 2)

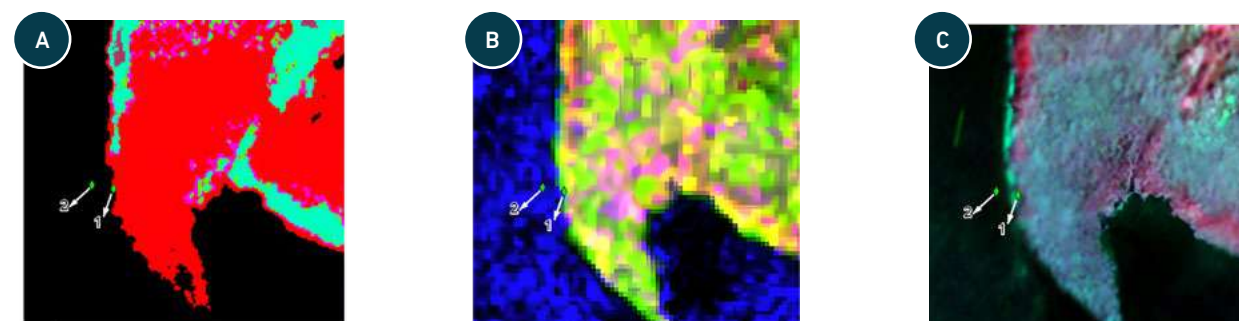
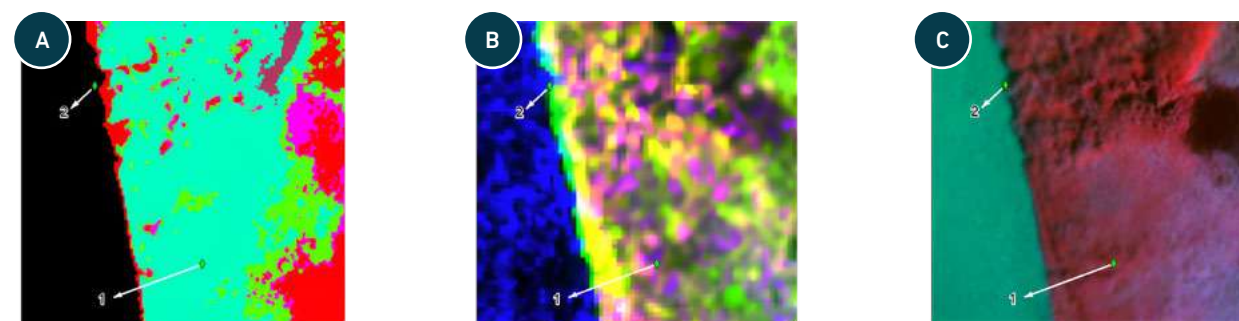


Figura 7.8. Acercamiento a los resultados de clasificación (ejemplo 3)



# Referencias

- Ali, M., Al-Yamani, F., & Polikarpov, I. (2011). The effect of tidal cycles on the community structure of plankton (with emphasis on copepods) at AFMED Marina in winter (a preliminary study). *Crustaceana*, 84(5-6), 601-621. <https://doi.org/10.1163/001121611X572814>
- Alonso, D. A., Vides, M. P., y Londoño, M. (2001). *Amenaza y riesgos ambientales en la zonas costeras colombianas. Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: año 2001*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar).
- Beltrán-León, B. S., & Morales Osorio, Y. A. (2021). Distribución, composición y abundancia del ictioplancton en tres áreas marinas protegidas del Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 31-52. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.1062>
- Benincà, E., Huisman, J., Heerkloss, R., Jöhnk, K. D., Branco, P., Van Nes, E. H., Scheffer, M., & Ellner, S. P. (2008). Chaos in a long-term experiment with a plankton community. *Nature*, 451(7180), 822-825.
- Bond, M. E., Babcock, E. A., Plkitch, E. K., Abercrombie, D. L., Lamb, N. F. y Chapman, D. (2012). Reef Sharks Exhibit Site-Fidelity and Higer Relative Abundance in Marine Reserves on the Mesoamerican Barrier Reef. *PLoS ONE*, 7(3), e32983.
- Borkman, D. G., & Smayda, T. (2009). Multidecadal (1959–1997) changes in Skeletonema abundance and seasonal bloom patterns in Narragansett Bay, Rhode Island, USA. *J. Sea Res.*, 61(1-2), 84-94.
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R., Rebelo, L.-M., Hilarides, L., Thomas, N., et al. (2018). The global mangrove watch—a new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing* 10:1669. doi: 10.3390/rs10101669
- Cardeñosa, D., Hyde, J. y Caballero, S. (2014). Genetic Diversity and Population Structure of the Pelagic Thresher Shark (*Alopias pelagicus*) in the Pacific Ocean: Evidence for Two Evolutionarily Significant Units. *PLoS ONE*, 9(10), e110193.
- Castaño-Mora, O. V., Cárdenas, G., Hernández, E. J. y Castro, F. (2004). Reptiles en el Chocó Biogeográfico-Catalogo. En J. O. Rangel (Ed.), *Colombia diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica* (pp. 599-632). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Tavera, H., Zapata, L. A. y Simard, M. (2021). Structural Characteristics of the Tallest Mangrove Forests of the American Continent: A Comparison of Ground-Based, Drone and Radar Measurements. *Front. For. Glob. Change* 4, 732468. 10.3389/ffgc.2021.732468
- Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Mejía-Rentería, J. C., and Rovere, A. (2019). Habitat mapping of remote coasts: evaluating the usefulness of lightweight unmanned aerial vehicles for conservation and monitoring. *Biol. Conserv.* 239:108282. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108282
- Castellanos-Galindo, G. A., Kluger, L. C., Camargo, M. A., Cantera, J., Mancera Pineda, J. E., Blanco-Libreros, J. F., et al. (2021). Mangrove research in Colombia: temporal trends, geographical coverage and research gaps. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 248:106799. doi: 10.1016/j.ecss.2020. 106799
- Castro-Herrera, F., Valencia, A. y Villaquirán, D. (2012). Diversidad de anfibios y reptiles del *Parque Nacional Natural Isla Gorgona*. Feriva Impresores S. A.
- Ceccarelli, D. y Colwell, R. R. (2014). Vibrio ecology, pathogenesis, and evolution. *Frontiers in Microbiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00256>
- Chang, H.-Y., McKown, K., & Chen, Y. (2023). A long-term ichthyoplankton monitoring program suggests climate-induced environmental variabilities changed fish communities in the Hudson River estuary. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1077997. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1077997>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Burquez, A., and Chidumayo, E. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Chang. Biol.* 20, 3177–3190.
- Córdoba, T., Espinosa, L. F. y Vivas, L. J. (2021). Ocurrencia y distribución de *Vibrio cholerae* cultivable en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 27(2). <https://doi.org/10.15446/abc.v27n2.92057>
- Corponariño (2023). En Nariño se decomisan 386 aletas de tiburón, un grave delito que pone en riesgo los ecosistemas marinos. *Noticias Corponariño*. <https://corponarino.gov.co/comunicado-de-prensa/>
- Dirisu, A. R. (2019). Plankton diversity and community structure of asarama estuary in the niger delta in relation to physico-chemistry. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5). [https://doi.org/10.15666/aeer/1705\\_1027710292](https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1027710292).
- Dulvy, N. K., Fowler, S. L., Musick, J. A., Cavanagh, R. D., Kyne, P., Harrison, L., Carlson, J., Davidson, L., Fordham, S., Francis, M., Pollock, C., Simpfendorfer, C., Burgess, G., Carpenter, K., Compagno, L., Ebert, D., Gibson, C., Heupel, M., Livingstone, S.,... White, W. (2014). Extinction risk and conservation of the world's sharks and rays. *eLife*, 3, e00590.
- EGGE, J., & AKSNES, D. (1992). Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 83(2), 281–289.
- Espinoza, M., Araya-Arce, T., Chaves-Zamora, I., Chinchilla, I. y Cambra, M. (2020). Monitoring elasmobranch assemblages in a data-poor country from the Eastern Tropical Pacific using baited remote underwater video stations. *Scientific reports*, 10(1), 17175.
- Fromard, F., Puig, H., Mougín, E., Marty, G., Betoulle, J.-L., Cadamuro, L., et al. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia* 115, 39–53. doi: 10.1007/s004420050489
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., et al. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecol Biogeogr.* 20, 154–159. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010. 00584.x
- Guarnizo, C. E., Paz, A., Muñoz-Ortiz, A., Flechas, S. V., Méndez-Narváez J. y Crawford, A. J. (2015). DNA Barcoding Survey of Anurans across the Eastern Cordillera of Colombia and the Impact of the Andes on Cryptic Diversity. *PLoS ONE*, 10(5), e0127312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127312>
- Guiry, M. D., Guiry, G. M., Morrison, L., Rindi, F., Miranda, S. V., Mathieson, A. C., Parker, B. C., Langangen, A., John, D. M., Bárbara, I., & others. (2014). AlgaeBase: an on-line resource for algae. *Cryptogamie, Algologie*, 35(2), 105–115.
- Hamilton, S. E., and Friess, D. (2018). Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nat. Clim. Change* 8, 240–244. doi: 10.1038/s41558-018-0090-4
- Hebert, P. D., Cywinska, A., Ball, S. L. y DeWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B. Biological sciences*, 270(1512), 313-321. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218>
- Heithaus, M. y Dill, L. (2006). Does Tiger Shark Predation Risk Influence Foraging Habitat Use by Bottlenose Dolphins at Multiple Spatial Scales? *Oikos*, 114(2), 257-264.
- Henao, K. y Montoya, S. (2021). *Informe Final Proyectos PNEC – DIMAR*. Comisión Colombiana del Océano.
- Jabado, R. W., Hameli, S., Grandcourt, E. M. y Dhaheri, S. (2018). Low abundance of sharks and rays in baited remote underwater video surveys in the Arabian Gulf. *Scientific Reports*, 8, 15597.
- IGAC. (2021). Procesamiento y evaluación de imágenes provenientes de sensores remotos. Procedimiento Interno IGAC. [https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-car-01\\_procesamiento\\_y\\_evaluacion\\_de\\_imagenes\\_provenientes\\_de\\_sensores\\_remotos\\_0.pdf](https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-car-01_procesamiento_y_evaluacion_de_imagenes_provenientes_de_sensores_remotos_0.pdf).
- Invemar (2019). Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros de Colombia 2019 (Serie de Publicaciones Periódicas Número 3).
- Kauffman, J. B., Adame, M. F., Arifanti, V. B., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R., et al. (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecol. Monogr* 90:e01405. doi: 10.1002/ecm.1405
- Kauffman, J. B., Heider, C., Cole, T. G., Dwire, K. A., and Donato, D. C. (2011). Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands* 31, 343– 352. doi: 10.1007/s13157-011-0148-9
- Li, Z., Zan, Q., Yang, Q., Zhu, D., Chen, Y., and Yu, S. (2019). Remote estimation of mangrove aboveground carbon stock at the species level using a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Remote Sens.* 11:1018. doi: 10.3390/rs11091018
- Lynch, J. D. y Suárez-Mayorga, A. M. (2004). Anfibios en el Chocó Biogeográfico. En J. O. Rangel (Ed.), *Colombia diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica* (pp. 633-667). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.

Morrissey, J. F. y Gruber, S. H. (1993). Habitat selection by juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Environmental Biology of Fishes*, 38, 311-319.

Navarro, A., Young, M., Allan, B., Carnell, P., and Macreadie, P. (2020). The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 242:111747. doi: 10.1016/j.rse.2020.111747

Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., Caceres, M. D., Durand, S., ... Weedon, J. (2022). *vegan: Community Ecology Package* (version 2.6-2) [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Oliver, J. y Oliver, K. (2007). *Vibrio Species*. En *Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers* (3.a ed). ASM Press.

Ortega, J. (2000). El objeto de la geografía: Las representaciones del espacio. En L. h. geografía. Ariel S.A., Editorial.

Otero, V., Van De Kerchove, R., Satyanarayana, B., Martínez-Espínosa, C., Bin Fisol, M. A., Bin Ibrahim, M. A., et al. (2018). Managing mangrove forests from the sky: forest inventory using field data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia. *For. Ecol. Manag.* 411, 35-45. doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.049

Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Múcher, S., Dawson, T. P., Fernandez, M., et al. (2016). Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 2, 122-131. doi: 10.1002/rse2.15

PNN. (2017). Actualización plan de manejo Parque Nacional Natural Sanquianga Territorio Ancestral y Colectivo 2018-2023.

PNN. (2017). *Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Sanquianga – Territorio Ancestral y Colectivo*.

Ratnasingham, S. y Hebert, P. D. (2013). A DNA-Based Registry for All Animal Species: The Barcode Index Number (BIN) System. *PLoS ONE*, 8(8), e66213. 10.1371/journal.pone.0066213

Restrepo A, J. D. (2012). Assessing the effect of sea-level change and human activities on a major delta on the Pacific coast of northern South America: The Patía River. *Geomorphology*, 151- 152, 207-223. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.004>

Revista Semana (2022, Marzo 3) Capitanes de embarcaciones pescaron 15 tiburones y fueron capturados en Tumaco. *Semana*. <https://www.semana.com/sostenible/actualidad/articulo/capitanes-de-embarcaciones-pescaron-15-tiburones-y-fueron-capturados-en-tumaco/202237/>

Ron, S. R. (2018). *Base de datos de la colección de anfibios del Museo de Zoología (QCAZ). Versión 1.0*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/portal/>

Rosenberg, E. y Falkovitz, L. (2004). The *Vibrio shiloi*/Oculina patagonica model system of coral bleaching. *Annu. Rev. Microbiol.*, 58, 143-159.

Rovai, A. S., Riul, P., Twilley, R. R., Castaneda-Moya, E., Rivera-Monroy, V. H., Williams, A. A., et al. (2016). Scaling mangrove aboveground biomass from site-level to continental-scale. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 25, 286-298. doi: 10.1111/geb.12409

Saliu, I. S., Satyanarayana, B., Fisol, M. A. B., Wolswijk, G., Decannière, C., Lucas, R., et al. (2021). An accuracy analysis of mangrove tree height mensuration using forestry techniques, hypsometers and UAVs. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 248:106971. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106971

SiB Colombia (2022, 23 de agosto). *Biodiversidad en cifras*. <https://biodiversidad.co/cifras>

Simard, M., Rivera-Monroy, V. H., Mancera-Pineda, J. E., Castañeda-Moya, E., and Twilley, R. R. (2008). A systematic method for 3d mapping of mangrove forests based on shuttle radar topography mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Remote Sens. Environ.* 112, 2131-2144. doi: 10.1016/j.rse.2007.10.012

Simpfendorfer, C. A. y Burgess, G. H. (2002). *Assessment of the status of the Atlantic sharpnose shark (Rhizoprionodon terraenovae) using an age-structured population model*. Northwest Atlantic Fisheries Organization.

Spalding, M. (2013). Los bosques de manglares como increíbles depósitos de carbono. *The Nature Conservancy*. <https://blog.nature.org/science/2013/10/11/new-science-mangrove-forests-carbon-store-map/>

Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdaña, Z. A., Finlayson, M., et al. (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *Bioscience* 57:573. doi: 10.1641/B570707

Suriya, J., Krishnan, M., Bharathiraja, S., Sekar, V. y Sachitanandam, V. (2020). Implications and Utility of DNA Barcoding. En S. Trivedi, H. Rehman, S. Saggi, C. Pannerselvam y S. K. Ghosh (Eds.), *DNA Barcoding and Molecular Phylogeny* (pp. 3-22). Springer.

Takemura, A. F., Chien, D. M. y Polz, M. F. (2014). Associations and dynamics of Vibrionaceae in the environment, from the genus to the population level. *Frontiers in Microbiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00038>

Thompson, F. L., Austin, B., Swings, J. G. by American Society for Microbiology (Eds.). (2006). *The biology of Vibrios*. ASM Press.

Toranza, C., & Arim, M. (2010). Cross-taxon congruence and environmental conditions. *BMC ecology*, 10, 18. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-10-18>

Trettin, C. C., Dai, Z., Tang, W., Lagomasino, D., Thomas, N., Lee, S. K., et al. (2021). Mangrove carbon stocks in Pongara National Park, Gabon. *Estuar. Coast. Shelf Sci* 259:107432. doi: 10.1016/j.ecss.2021.107432

Turner, J. W., Good, B., Cole, D. y Lipp, E. K. (2009). Plankton composition and environmental factors contribute to Vibrio seasonality. *The ISME Journal*, 3(9), 1082-1092. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.50>

Unesco. (2024). Día Internacional de Conservación del Ecosistema de Manglares. <https://www.unesco.org/es/days/mangrove-ecosystem-conservation>

Ward-Paige, C. A., Mora, C., Lotze, H. K., Pattengill-Semmens, C., McClenachan, L., Arias-Castro, E. y Myers, R. A. (2010). Large-Scale Absence of Sharks on Reefs in the Greater-Caribbean: A Footprint of Human Pressures. *PLoS ONE*, 5, e11968.

Wong, Y. Y., Lee, C. W., Bong, C. W., Lim, J. H., Narayanan, K. y Sim, E. U. H. (2019). Environmental control of *Vibrio* spp. Abundance and community structure in tropical waters. *FEMS Microbiology Ecology*, 95(11), fiz176. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz176>

Worm, B., Davis, B., Kettner, L., Ward-Paige, C. A., Chapman, D., Heithaus, M. R., Kessel, S. T. y Gruber, S. H. (2013). Global catches, exploitation rates, and rebuilding options for sharks. *Marine Policy*, 40, 194-204.

Worthington, T. A., Andradi-Brown, D. A., Bhargava, R., Buelow, C., Bunting, P., Duncan, C., et al. (2020). Harnessing big data to support the conservation and rehabilitation of mangrove forests globally. *One Earth* 2, 429-443. doi: 10.1016/j.oneear.2020.04.018



Para más información  
scanee el QR



Rana kokoi  
*Oophaga sp.*

Cofinanciadores:





