

An underwater photograph showing two divers in black wetsuits and blue fins. They are positioned around a white metal frame structure on the seabed. The water is clear and blue, with some sparse vegetation visible in the background.

# **BUCEO CIENTÍFICO:**

## **Procedimientos y metodologías**

**Juan Armando Sánchez  
Elvira María Alvarado  
Luis Fernando Barrios  
Edgardo Ochoa**

**ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
COLECCIÓN JORGE ÁLVAREZ LLERAS No. 45**



ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
COLECCIÓN JORGE ÁLVAREZ LLERAS, N° 45



# **BUCEO CIENTÍFICO:** **Procedimientos y metodologías**

## **Editores**

Juan Armando Sánchez,  
Elvira María Alvarado,  
Luis Fernando Barrios y  
Edgardo Ochoa

Bogotá, D.C., 2023

**Catalogación en la publicación de la Academia Colombiana  
de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

Juan Armando Sánchez, Elvira María Alvarado, Luis Fernando Barrios y Edgardo Ochoa. Buceo científico: Procedimientos y metodologías. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2023.

308 p. il. (Colección Jorge Álvarez Lleras No. 45)

ISBN: 978-628-95506-9-6

**Palabras clave:** 1. Ciencias subacuáticas, 2. Buceo científico, 3. Oceanografía, 4. Arqueología submarina, 5. Métodos de muestro, 6. Biología marina, 7. Latinoamérica, 8. Políticas públicas.

**BUCEO CIENTÍFICO:  
Procedimientos y metodologías**

© Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Carrera 28A No. 39A-63, Apartado 44763, Bogotá, D.C. Colombia  
2023

© Juan Armando Sánchez, Elvira María Alvarado, Luis Fernando Barrios y  
Edgardo Ochoa  
2023

ISBN: 978-628-95506-9-6

**Diagramación e Impresión:**

Editorial Gente Nueva  
Pbx: 320 28 40

**Entidades coordinadoras**

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN)  
Federación Colombiana de Actividades Subacuáticas (FEDECAS)  
Ministerio del deporte (Min deporte)  
Conservación Internacional



**MINEDUCACIÓN**



**GOBIERNO  
DE COLOMBIA**

Esta Publicación se ha financiado mediante la transferencia de  
recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

El Ministerio de Educación Nacional no es responsable  
de las opiniones aquí expresadas

*Derechos reservados. Este libro o partes del mismo no pueden ser reproducidos sin la autorización de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de los autores.*

*A la memoria  
de Enrique Forero*



## **Agradecimientos**

La idea de realizar un manual de buceo científico nació durante la Misión Internacional de Sabios - 2019 en Colombia, dentro del foco de océanos y recursos hidrobiológicos, cuyo equipo apoyó plenamente esta iniciativa que se encuentra publicada dentro de los resultados de la misión. Agradecemos a todos los miembros del foco, en especial a Andrés Franco, Jaime Cantera y Enrique Peña. Asimismo, queremos agradecer al presidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (ACCEFYN) 2015-2022, Enrique Forero, quien apoyó la idea de un manual de buceo científico con gran entusiasmo, en especial con el ánimo de ver una de las propuestas de M.I.S. hecha realidad. Ante todo, este manual es una construcción colectiva de Latinoamérica gracias a la contribución de colegas de México, El Salvador, Costa Rica, Chile, Ecuador y Colombia. Estamos inmensamente agradecidos con los autores que dedicaron su atención para enviarnos sus contribuciones. Reconocimiento especial a Michael Lang por escribir un prólogo para este manual. Sus experiencias en el buceo científico en los Estados Unidos de América y la Academia Americana para las Ciencias Subacuáticas ha sido una gran inspiración para nosotros.



# Contenido

<b>Prólogo</b> .....	<b>13</b>
----------------------	-----------

*Michael A. Lang PhD.*

## **Presentación**

<b>¿Por qué un Manual de Buceo Científico?</b> .....	<b>17</b>
--	-----------

*Juan Armando Sánchez, Elvira María Alvarado,  
Luis Fernando Barrios y Edgardo Ochoa*

## **Buceo científico: primero la seguridad**

Buceo científico .....	25
------------------------	----

1 Física y Buceo .....	33
------------------------	----

*Isabel Cristina Hoyos Rincón*

2 Propuesta de protocolo de buceo seguro para actividades científicas.....	53
--	----

*Edgardo Ochoa*

*Jorge Dario Gómez Cantillo*

3 Guía de operaciones en primeros auxilios y plan de emergencia en buceo científico.....	75
--	----

*Luis Fernando Barrios H.*

4 Nuevas perspectivas y moduladores inflamatorios de la enfermedad por descompresión.....	89
---	----

*E. Cuauhtémoc Sánchez Rodríguez*

5 Consideraciones antes, durante y después del buceo científico .....	103
---	-----

*Andrés López Pérez, Rebeca Granja Fernández, Omar Valencia Méndez  
Pedro Medina Rosas, Virgilio Antonio Pérez*

## **Técnicas y procedimientos de buceo científico**

- 6 Técnicas para el desarrollo del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia – SIMAC ..... 111  
*Raúl Navas-Camacho*
- 7 Introducción a la arqueología subacuática; metodologías de búsqueda, registro, documentación y difusión del patrimonio cultural sumergido ..... 121  
*Eduardo Roa Brynildsen*
- 8 La fotogrametría digital submarina como herramienta para la cuantificación de formas y el monitoreo de sistemas arrecifales..... 133  
*Diego García Medrano, Eduardo Ramírez Chavez, Luis José Ortiz Martínez, Sergio Guendulain García, Andrés López Pérez*
- 9 Técnicas de monitoreo oceanográfico para la detección de variables que inciden en la sobrevivencia de recursos marinos ..... 143  
*Arturo Hernández Velasco, Raziél Hernández Pimienta Alfonso Romero Castro*
- 10 Pásame la botella: muestreo subacuático para la caracterización del sistema de carbonatos..... 151  
*Celeste Sánchez-Noguera, Carla F. Berghoff, Lucía Epherra José Carlos Hernández*
- 11 Monitoreo batimétrico como herramienta para la identificación de agregaciones reproductivas de peces ..... 163  
*Jacobo Camaal, Arturo Hernández Velasco*
- 12 Técnicas de monitoreo de arrecifes rocosos del golfo de California, México ..... 171  
*Arturo Hernández Velasco, Melo Francisco Fernández Rivera Imelda G. Amador Castro. Raziél Hernández Pimienta*
- 13 Técnicas de monitoreo del bosque de sargazo gigante, México ..... 179  
*Arturo Hernández Velasco, Alfonso Romero Castro Raziél Hernández Pimienta*
- 14 Revisión sobre censos preliminares de peces mediante buceo autónomo en lagos volcánicos de El Salvador ..... 187  
*José Enrique Barraza, Edgardo Ochoa*

15	Profundizando en el conocimiento de la biodiversidad marina al norte del pacífico costarricense: alcances del buceo científico en el proyecto BioMar-ACG.....	193
	<i>José Leonardo Chacón-Monge, Sebastián Mena, Gilberth Ampié-Cruz Arturo Angulo, Beatriz Naranjo-Elizondo, Odalisca Breedy Carolina Sheridan-Rodríguez, Jorge Cortés</i>	
16	Metodologías para el monitoreo de octocorales, esponjas y cobertura béntica en los arrecifes rocosos de El Salvador, centroamérica .....	205
	<i>Johanna Segovia</i>	
17	Especialidad de buceo para el monitoreo de agregaciones reproductivas de peces como una herramienta de conservación y ecoturismo .....	213
	<i>Arturo Hernández Velasco, Arturo Ramírez Valdez, Edgardo Ochoa</i>	
18	Comparación de tres métodos para el estudio de las comunidades bentónicas sésiles en arrecifes coralinos.....	221
	<i>Ana M. Palacio Castro, Fernando A. Zapata</i>	
19	Estéreo-video operado por buzos: Una potente herramienta para realizar estudios comparativos de tallas de peces marinos.....	231
	<i>Natalia Rivas-Escobar, Arturo Acero P., José Tavera</i>	
20	Técnicas letales y no letales para el estudio de peces marinos en Colombia.....	239
	<i>Alejandra Puentes-Sayo, Natalia Rivas-Escobar, Arturo Acero P., Olga Torres-Suárez, José Tavera</i>	
21	Técnicas para el marcaje de tiburones mediante buceo en el Pacífico colombiano .....	247
	<i>Sandra Bessudo, Felipe Ladino Archila</i>	
22	Técnicas para el levantamiento de fotomosaicos para el monitoreo ecológico de arrecifes coralinos .....	255
	<i>Phanor H Montoya Maya</i>	
23	Evaluación de interacciones entre corales masivos y otros organismos bentónicos.....	267
	<i>Catalina Gómez-Cubillos, Carlos Andrés Daza-Guerra Juan Carlos Márquez, Sven Zea</i>	

- 24 Técnicas para el marcaje y monitoreo de octocorales, “bosques de animales”, en el Caribe y Pacífico colombianos.....281  
*Juan A. Sánchez, Luisa F. Dueñas*
- 25 Exploración de los ecosistemas coralinos mesofóticos (30-120 m) mediante buceo técnico de circuito cerrado (CCR-TRIMIX).....289  
*Juan A. Sánchez, Julio Andrade, Luisa F. Dueñas, Nacor Bolaños*
- 26 Técnicas para el monitoreo del crecimiento invasivo del octocoral *Carijoa riisei*. “Coral copo de nieve” en el Frente Ecuatorial, Pacífico Oriental Tropical .....299  
*Karla B. Jaramillo, Thierry Pérez*

## Prólogo

Antes del desarrollo del buceo, varios científicos pioneros de la Universidad de California en San Diego - Institución Scripps de Oceanografía estaban explorando el mundo submarino con esnórquel y equipos de buceo suministrados desde la superficie para hacer observaciones y recopilar datos en el medio marino. Su primer buzo científico fue el estudiante graduado CK Tseng, quien en 1944 utilizó equipos japoneses suministrados desde la superficie para recolectar algas en la costa de San Diego. En 1950, el estudiante graduado de UCLA Conrad Limbaugh y el investigador Andreas Rechnitzer aprendieron por sí mismos a usar el recientemente disponible equipo de buceo autónomo llamado Aqualung para hacer observaciones directas y realizar experimentos bajo el agua. En 1953, el aumento de la disponibilidad de equipos de buceo y el desarrollo de procedimientos de capacitación y certificación dieron como resultado la aceptación por parte de la Universidad de California para el uso del buceo como un medio viable para realizar investigaciones académicas.

Bajo la dirección de Limbaugh como primer oficial de seguridad de buceo de la Institución Scripps de Oceanografía, este programa de entrenamiento de buzos estableció el estándar en la Universidad de California y dio como resultado la primera *Guía universitaria para la seguridad del buceo*, promulgada por Jim Stewart y publicada en 1967. Este programa de estándares médicos, de entrenamiento y operacionales en buceo sirvió como modelo para numerosas agencias civiles de entrenamiento de buceo y como guía en 1980 para la formación de la Academia Americana de Ciencias Subacuáticas.

El buceo realizado de una manera que maximice la protección de todos los buceadores científicos contra lesiones y/o enfermedades ocasionadas por accidentes es una obligación ética de las instituciones de investigación y los empleadores y se rige internacionalmente por diversas regulaciones de salud y seguridad. Los recursos en seguridad médica para el buceo (por ejemplo, Divers Alert Network) están hoy más disponibles que nunca que en el pasado. Existe en la literatura científica clara evidencia de la eficacia y productividad

del buceo científico seguro. A nivel mundial, y reconociendo los mecanismos mediante los cuales se financia la ciencia, muchas colaboraciones internacionales validan el éxito en la uniformidad de los estándares médicos, de capacitación y operativos que mejoran la productividad y la seguridad de la ciencia bajo el agua. Los autores de este volumen deben ser elogiados y reconocidos por sus esfuerzos en la introducción y búsqueda de tales puntos en común en América Latina.

La importancia del buceo científico como una valiosa herramienta de investigación al colocar el ojo del científico entrenado bajo el agua para hacer observaciones y realizar experimentos se evidencia por un volumen significativo de proyectos de investigación de alto perfil que de otro modo no podrían haberse realizado (Lang et al. 2009; 2013; Lang y Baldwin, 1996). El proceso de publicación y revisión arbitrada valida la viabilidad y eficacia del buceo como metodología de investigación.

La similitud entre la investigación submarina en los polos y los trópicos es su imagen compartida de “lejanía” que los mantiene alejados de los pensamientos de la sociedad que patrocina nuestra investigación. De hecho, creemos que los polos y los trópicos son ahora “canarios en la mina de carbón” porque están a la vanguardia del cambio climático. Nos enfrentamos a la tarea desesperada de educar a la sociedad para que nuestros problemas globales no se limiten a las áreas densamente pobladas de América, Europa y Asia. A través del buceo científico podemos aumentar nuestra comprensión de cómo los sistemas marinos afectan la habitabilidad de nuestro planeta a través del monitoreo a largo plazo y la observaciones de los cambios cíclicos a corto plazo, las interacciones geosfera / atmósfera y la interconectividad de los sistemas físicos, biológicos y sociales.

El valor del buceo es que los descubrimientos de procesos naturales no necesariamente requieren lógica deductiva, pero proporcionan los medios para hacer observaciones novedosas y directas. Los artículos de este volumen, y el buceo en general a lo largo de las décadas, han estimulado una revolución en la ciencia marina comparable a la invención del microscopio y el vuelo espacial tripulado.

## Referencias

1. Lang MA, Baldwin CC, eds. 1996. *Methods and Techniques of Underwater Research*.
2. Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences Symposium. Washington DC: Smithsonian Institution. 236 pp.

3. Lang MA, Macintyre IG, Rützler K. 2009. Proceedings of the Smithsonian Marine Science Symposium. *Smithson Contrib Mar Sci*:38. 529pp. Washington DC: Smithsonian Institution Scholarly Press.
4. Lang MA, Marinelli RL, Roberts SJ, Taylor PR. 2013. Research and Discoveries: The Revolution of Science through SCUBA. *Smithson Contrib Mar Sci*: 39. 258 pp. Washington DC: Smithsonian Institution Scholarly Press.

**Michael A. Lang PhD.**  
Universidad de California –  
Medicina de Emergencia Centro de Excelencia en Buceo



# ¿Por qué un Manual de Buceo Científico?

---

Juan Armando Sánchez, Elvira María Alvarado,  
Luis Fernando Barrios y Edgardo Ochoa

---

*“No son las [profundidades] las que conquistamos,  
sino a nosotros mismos.”*

– Edmund Hillary

*“Vivimos en una sociedad minuciosamente  
dependiente de la ciencia y la tecnología, en la  
que casi nadie sabe nada de ciencia y tecnología.”*

– Carl Sagan

*“He tenido la dicha de pasar miles de horas  
bajo el mar. Desearía poder llevar a la gente  
a ver lo que veo y saber lo que sé”*

– Silvia Earle

El fondo del mar y en general los océanos en su gran inmensidad son desconocidos para la mayoría de las personas. Gran parte de nuestras costas, bancos coralinos e incluso lagunas costeras han sido poco exploradas. No es un secreto que generalmente pasamos por alto al mundo subacuático a la hora de pensar en el ambiente y en los beneficios que recibimos de este. Necesitamos fomentar los océanos y su entorno para que se permita investigarlos sin restricciones. Pese a esto, las ciencias marinas deben su avance en un porcentaje mayoritario a la investigación realizada mediante buceo SCUBA, por sus siglas en inglés *Self-Contained Underwater Breathing Apparatus*. El buceo es una actividad cada vez más segura y popular. Su fomento es una respuesta directa a la necesidad de conocer mejor nuestros mares. Sin embargo, las carreras

profesionales –con algunas excepciones– que utilizan buceo en América Latina no lo incorporan formalmente dentro de su currículo y, generalmente, son una minoría los estudiantes que se certifican como buzos de forma particular. Esta brecha es aún mayor en las regiones y en los estudiantes de las universidades públicas. La mayor motivación de producir un primer ‘Manual de procedimientos y metodologías para buceo científico’ es fomentar esta herramienta de investigación a la comunidad académica en la educación superior.

Queremos buscar las formas de establecer estándares que permitan la colaboración interinstitucional para masificar el buceo científico y reducir los costos para los estudiantes e investigadores. Regular las buenas prácticas, en especial las normas de seguridad en buceo científico, es el primer paso para fortalecer e impulsar esta creciente comunidad científica.

Este manual es el producto del trabajo interinstitucional de actores experimentados y reconocidos en el tema, junto con un llamado a la comunidad científica, así como a diversas instituciones y grupos a nivel costero o continental que practican el buceo científico para mostrar el estado del arte de la disciplina y generar unas bases sólidas para su impulso. La meta es que este manual –realizado con la cooperación de todos los actores interesados que acudieron al llamado– se convierta en la base para los requerimientos académicos, las condiciones y especificaciones técnicas, así como las medidas de seguridad y de práctica del buceo científico, ante las autoridades académicas y marítimas.

#### **Recomendaciones de la Misión Internacional de Sabios 2019<sup>1</sup>**

El buceo científico es aquel que se usa para la toma de datos biológicos, fisicoquímicos, geológicos o arqueológicos. En esencia un buzo científico, además de tener un título profesional o estar en proceso de obtenerlo, debe ser muy hábil bajo el agua para además de llevar la práctica normal del buceo, poder manipular cámaras y equipos, tomar datos y reconocer elementos particulares del mundo subacuático. Además de los certificados que cualquier persona podría acceder hasta el nivel de buzo de rescate, el buzo científico debe cumplir con requerimientos mínimos de preparación física, en natación y buceo a pulmón, así como entrenarse en procedimientos de rescate y primeros auxilios cada año. El entrenamiento de buceo científico incluye también evaluaciones teóricas sobre el medio subacuático, la fisio-

---

1 Tomado del volumen IX, sobre textos de: Juan Armando Sánchez, Carlos Edwin Gómez y Luis Fernando Barrios (SENA–FEDECAS–CMAS) (M.I.S.2019, CC BY).

logía del buceo, las técnicas del buceo técnico y el uso de computadores de buceo, entre otras<sup>3</sup>.

Existen diversos programas de buceo científico a nivel internacional como lo son la Academia Americana para las Ciencias Subacuáticas (AAUS por sus siglas en inglés), Academia Canadiense para las Ciencias Subacuáticas (CAUS por sus siglas en inglés), la Confederación Mundial de Actividades Subacuáticas (CMAS) y Panel Europeo de Buceo Científico (ESDP por sus siglas en inglés). El propósito de estos programas es el de regular de una manera independiente el buceo científico, controlando que se lleve a cabo de una manera segura bajo condiciones experimentales y ambientales variadas con el fin de evitar accidentes y/o lesiones<sup>4</sup>. En ninguna instancia estos programas técnicos de buceo científico deberían mezclarse con programas de buceo técnico profesional e industrial.

En la década de 1980 se creó en los EE.UU. la Academia Americana de Ciencias Subacuáticas (AAUS por sus siglas en inglés) que cuenta con cerca de 130 miembros institucionales entre universidades, institutos de investigación, museos y acuarios<sup>5</sup>. Solamente la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) de EUA cuenta con más de 2000 buzos científicos certificados<sup>6</sup>. Su creación se motivó para distanciarse de la regulación imperante sobre buceo comercial de ese país, cuyos estándares de seguridad eran tan exigentes, y los equipos tan sofisticados, que imponían una tarea imposible para una actividad enfocada a la docencia e investigación. No obstante, el buceo científico cuenta con rigurosos estándares de entrenamiento, seguridad y seguimiento, incluyendo la creación de un programa de buceo dentro de cada institución cuyo supervisor se encarga de dar seguimiento a las actividades subacuáticas de los investigadores, especialmente en grandes laboratorios y estaciones de investigación marina de Estados Unidos<sup>5</sup>. En diversas universidades a nivel mundial, el entrenamiento de buceo científico se incorpora como un curso adicional que hace parte de carreras relacionadas con la biología marina, arqueología subacuática, etc., y se integra al *pensum* como un prerrequisito para cursar algunas materias<sup>7</sup>. Existe una reciprocidad entre las instituciones afiliadas a la AAUS que permite que los miembros de sus programas de buceo puedan realizar actividades subacuáticas en cualquiera de las instituciones miembro<sup>5</sup>.

En América Latina el buceo es una actividad autorregulada en donde los operadores de buceo y los investigadores se ciñen a los estándares de las agencias internacionales que expiden licencias (por ejemplo, PADI, NAUI, SDI, CMAS). No existen programas o estándares de buceo científico en Colombia, pero cabe mencionar la experiencia de la Federación Colombiana

de Actividades Subacuáticas (FEDECAS) que en convenio con CMAS –la agencia europea con más experiencia en buceo científico– ha realizado dos cursos en el país, donde además varios buzos expertos se certificaron al nivel de instructores de buceo científico. Sin embargo, Colombia con dos océanos y diversos recursos hidrobiológicos debería contar con un programa similar a la AAUS, incluso contar con reciprocidad con esta agencia.

Si aprendemos de esa experiencia de la AAUS, el buceo científico en Colombia debería ser regulado inicialmente por un consorcio o asociación académica (p.ej., Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales) en asocio con FEDECAS. Inicialmente se definirían los estándares y las normas para los programas del buceo científico en Colombia, generando manuales de estándares y metodologías al que se ciñan las universidades e institutos. Luego la Federación podría realizar un acompañamiento y certificación para que la práctica del buceo científico se desarrolle en Colombia bajo los mismos estándares y normas de seguridad. Obviamente una ley del buceo es necesaria en Colombia, pero ante todo debe contribuir al fomento de la actividad y el avance de las actividades subacuáticas antes que convertirse en una barrera con los trámites equivocados.

## **¿Qué es el buceo científico?**

El buceo científico puede definirse como el uso de técnicas de buceo seguras para llevar a cabo el trabajo subacuático en la búsqueda directa de información, colecta de datos y muestras. Los buzos científicos son normalmente científicos profesionales o científicos en entrenamiento (estudiantes), que utilizan equipos y técnicas de buceo como herramienta para llevar a cabo su trabajo de campo.

Estar presencialmente en el campo es la mejor opción para la obtención directa de datos y muestras. Particularmente, el investigador subacuático está entrenado para reconocer rasgos de sus localidades subacuáticas de interés. Su entrenamiento incluye una mejora en sus capacidades visuales para percibir la profundidad y el color, reconocer texturas y formas con el tacto, así como la habilidad mental de integrar todo rápidamente. Esto le permite hacer evaluaciones preliminares rápidas de la distribución y orientación espacial de los sujetos de estudio, situación necesaria para realizar observaciones y experimentos en entornos subacuáticos.

La observación directa utilizando el buceo ha transformado las ciencias marinas en general, y la biología marina y química marina en particular. La arqueología subacuática y geología son otros ejemplos de ciencias que, bajo el agua, han experimentado grandes avances por el uso de esta herramienta. El

buceo científico se lleva a cabo en instituciones educativas, dependencias de gobierno y organizaciones ambientales siempre en apoyo a sus programas de investigación.

El equipo utilizado varía ampliamente en este campo y generalmente se selecciona en función de costos, efectividad, disponibilidad y factores de riesgo. El buceo autónomo de circuito abierto (SCUBA por sus siglas en inglés) es el más utilizado, ya que está ampliamente probado, es accesible y es la forma más utilizada como formación inicial. El buceo científico puede y debe ser regulado por una legislación sobre seguridad en el trabajo o como mínimo debe ser autorregulado por la institución, dependencia u organización auspiciante. El historial de seguridad de esta actividad es en general bueno debido principalmente al entrenamiento y experiencia previa de los participantes. Mediante algunas organizaciones, existen acuerdos internacionales que facilitan a científicos de diferentes lugares de trabajo, pero con interés común, colaborar en proyectos y programas de investigación y educativos mediante el reconocimiento de los niveles mínimos aceptables de competencia por las partes interesadas.

Los aportes de este manual están divididos en dos partes: la primera parte se dedica a la gestión de la seguridad y la planeación en el buceo científico y la segunda, es una muestra del estado del arte, que a su vez son historias de éxito de la actividad, en las técnicas y procedimientos para la investigación y avance en el conocimiento mediante toma de datos bajo el agua.





**Buceo científico: primero la seguridad**



## Buceo científico

Aunque el buceo fue considerado alguna vez como una actividad tan peligrosa como ser piloto en la Fórmula 1, hoy en día puede llegar a ser una actividad tan segura como nadar en una piscina, en especial si la gestión de la seguridad es una prioridad. El manual quiere, ante todo, divulgar las bondades y posibilidades del buceo, para esto Isabel Cristina Hoyos Rincón, de una forma magistral, nos expone la fascinante física y fisiología del buceo en el capítulo 2, temas que todo profesional dedicado al buceo debe tener muy presente para realizar una correcta autogestión de su seguridad y así poder maximizar los beneficios de las actividades subacuáticas. Luego se presenta una propuesta de protocolos de buceo seguro en el capítulo 3 por Edgardo Ochoa y Darío Gómez, que pensamos puede ser adoptada en los entornos académicos del buceo científico en Latinoamérica. La idea es que los protocolos de seguridad no se conviertan en un trámite que impida el flujo de la investigación subacuática sino en un aliado para poder realizar buceo científico con la mayor seguridad posible, sin incluir requisitos desmedidos e innecesarios, como que quizás aún se mantienen en programas que llevan más tradición. Uno de los aspectos que caracteriza a un buzo científico es su capacidad de reaccionar ante un accidente de buceo. Luis Fernando Barrios, en el capítulo 4, provee una guía actualizada de los primeros auxilios y la preparación de cualquier buceo científico que debe incluir un plan de emergencia: “planea tu buceo y bucea tu plan”, dicen los instructores de buceo más experimentados. El buceo científico, como cualquier actividad de buceo repetitiva, cerca de los límites de no descompresión o incluyendo descompresión, expone al organismo humano a un estrés fisiológico que puede tener complicaciones como la enfermedad por descompresión: el gran riesgo latente al respirar aire comprimido varias atmósferas debajo del agua. El doctor Cuauhtémoc Sánchez Rodríguez nos actualiza en el capítulo 5 sobre los hallazgos médicos de la enfermedad por descompresión. Entre más conozcamos los riesgos del buceo mejor será nuestra gestión de su seguridad. Cerrando el tema de gestión de la seguridad y la planificación del buceo científico, Andrés López Pérez y colegas nos muestran en el capítulo 6 una visión global del proceso

de buceo científico para la formación de programas y grupos experimentados desde México.

## **Técnicas y procedimientos de buceo científico en Latinoamérica**

Los inicios de las ciencias marinas y subacuáticas en Latinoamérica surgieron mucho años después que el naturalismo y el estudio de los continentes. Podemos mencionar al barón Alexander Von Humboldt en los siglos XVIII - XIX, por ejemplo, entre una larga lista de científicos interesados en la biodiversidad y la historia natural de esta región desde tiempos coloniales. Pero ¿desde cuándo se inició el interés por las ciencias subacuáticas en Latinoamérica? La verdad es que fue algo más reciente, quizás no antes de mediados del siglo pasado y tal vez como una localidad de paso de algunas expediciones de mayor envergadura regional.

Aunque este tema daría para escribir otro libro, lo que sí podemos decir aquí es que en la actualidad tenemos un pujante desarrollo del buceo científico con actores locales gracias a los pioneros de la investigación subacuática. A finales de la década de 1950, el inglés Thomas Goureau se sumergía por primera vez en los arrecifes coralinos de Jamaica realizando mapas de sus fondos con una tabla acrílica y un lápiz, método que dejó registrado en un seminal artículo<sup>8</sup>, iniciando una escuela de indiscutible influencia para la investigación subacuática mundial desde la estación de Discovery Bay. En la década de 1960, en la isla de San Andrés, Colombia, inició con Joern Geister, mientras realizaba su tesis doctoral sobre la geología de los arrecifes del archipiélago de San Andrés y Providencia, su investigación continuó hasta la década de 1990<sup>9,10</sup>. A los que tuvimos la oportunidad de hacer un buceo con él, nos queda el recuerdo de su tranquilidad debajo del agua y que podía hacerlo con la misma indumentaria con que vestía regularmente: simplemente cambiaba del medio en el que se encontraba.

Por la misma década de los 60, la Universidad de los Andes y la Universidad de Giessen Justus -Liebig, se establecen en los escarpes de la bahía de Santa Marta el Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín dando inicio formal a la investigación subacuática en Colombia con muchos nombres de gran influencia como el alemán Bern Werding y el colombiano de origen alemán Henry Von Prahl, por destacar algunos. Este último siguió su escuela en la Universidad del Valle, en Cali, Colombia, abriendo toda una nueva vertiente de investigación subacuática en el Pacífico desde la

bahía de Buenaventura y la isla de Gorgona, hasta su prematura partida en 1989. Su libro de corales y arrecifes de Colombia fue por muchos años lo más parecido a una guía de sitios de buceo y una inspiración para muchos de los que se dedican al buceo científico en el país. El Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas de Punta Betín fue el epicentro del buceo científico en Colombia. Se buceaba con tanque doble y se aprendía de colega a colega utilizando las tablas desarrolladas por la Armada de EUA. El Instituto se convirtió posteriormente en lo que es hoy en día INVEMAR, un moderno instituto de investigación marina con un programa de buceo establecido. Un hito intermedio que catapultó la investigación subacuática en Colombia fue el proyecto de *Áreas arrecifales de Colombia* liderado por Juan Manuel Díaz, Sven Zea y Jaime Garzón Ferreira. Este proyecto impulsó las expediciones a los arrecifes más remotos del país requiriendo de meses enteros de exploración subacuática y generando desde los 90 numerosas contribuciones al entorno subacuático<sup>11</sup>. No obstante, desde hacía más de dos décadas, estudiantes de biología de varias universidades en Colombia venían utilizando el buceo como herramienta para cumplir con asignaturas y para realizar sus trabajos de grado. Muy pocos de ellos estaban entrenados por expertos para ejercer la actividad. Afortunadamente, la situación ha mejorado en la actualidad y las perspectivas son aún mejores. El capítulo 7, escrito por un investigador de INVEMAR, Raúl Navas Camacho, nos describe las técnicas actuales para el desarrollo del sistema nacional de monitoreo de arrecifes coralinos en Colombia - Simac. El programa de monitoreo subacuático más antiguo y regular en Colombia que nace con la adición de Colombia a la red CARICOMP (Caribbean Coastal Marine Productivity, por sus siglas en inglés) en la década de los noventa por el mismo Jaime Garzón Ferreira.

Los primeros exploradores subacuáticos en América lo hacían para extraer los productos del mar como las langostas, ostras perlíferas, el ostión y el *spondylus*, siendo muchas de las tribus del Caribe reconocidas por sus habilidades en el buceo a pulmón. Los primeros naufragios en América, como ha sido documentado para el galeón de nuestra señora de Atocha en los cayos de la Florida, por ejemplo, se trataban de rescatar mediante unas anclas de cuatro uñas que los mismos españoles encargaban a indígenas de las islas para que trataran de enganchar objetos de valor, quienes lograban hacerlo a profundidades generalmente mayores a 20 m. No obstante, son miles los naufragios de los que nunca se pudo recuperar nada y muchos están por encontrarse enterrados bajo el sedimento marino. Eduardo Roa Brynildsen en el capítulo 8 nos habla de una de las grandes ramas del buceo científico: la

arqueología subacuática. Una demandante actividad necesaria para la búsqueda, registro y difusión del patrimonio cultural sumergido, otra de las fronteras poco exploradas de nuestros ambientes submarinos.

Debemos hacer una aclaración antes de presentar los capítulos que nos comparten sus técnicas y procedimientos de buceo científico: esto es una primera muestra de aquellos investigadores que acudieron al llamado. De todas formas, creemos que esta selección nos da una buena idea de la actividad en la región. El buceo científico depende en gran medida de la tecnología. No solamente por los mismos equipos para respirar por debajo del agua, sino para la toma y registro de información. En el capítulo 9, Diego García Medrano y colegas nos presentan los avances de la fotogrametría digital submarina como herramienta para la cuantificación de formas y el monitoreo de sistemas arrecifales, ecosistemas amenazados por diversos aspectos como el cambio climático y la presión antropogénica que requieren de una constante observación. En el capítulo 10, Arturo Hernández Velasco y colegas nos presentan cómo el buceo científico también es utilizado para el monitoreo oceanográfico hacia la detección de variables que inciden en la sobrevivencia de recursos marinos. La oceanografía siempre ha utilizado diversos diseños de botellas para la toma de agua, así como la realización de experimentos. Celeste Sánchez Noguera y colegas, en el capítulo 11, nos presentan sus avances con el uso de botellas para experimentos de caracterización del sistema de carbonatos, hoy en día de gran importancia hace la obtención de cálculos correctos del secuestro de carbono en los océanos.

La diversidad de técnicas que se utilizan en el buceo científico nos ha permitido estudiar no solo los elementos inmóviles del fondo marino, sino los organismos móviles generalmente de difícil seguimiento. En el capítulo 12, Jacobo Camaal y Arturo Hernández Velasco nos presentan su monitoreo batimétrico como herramienta para la identificación de agregaciones reproductivas de peces, el momento crítico para el mantenimiento de las especies que tienen esta estrategia reproductiva y de vital importancia para su conservación. En el capítulo 13, Arturo Hernández Velasco y colaboradores nos exponen cómo realizan el monitoreo de arrecifes rocosos del Golfo de California, México, uno de los ecosistemas más extensos del continente americano. En el capítulo 14, Arturo lidera otro estudio para el monitoreo del singular bosque de sargazo gigante. En el capítulo 15, nos complace presentar la contribución de Johanna Segovia sobre sus estudios del monitoreo de octocorales, esponjas y cobertura béntica en los arrecifes rocosos de El Salvador, una de las regiones menos exploradas de Centroamérica. Desde El Salvador también, José Enrique Barraza

y Edgardo Ochoa nos presentan en el capítulo 16 otro singular estudio sobre las técnicas para el estudio de peces en los lagos volcánicos: el buceo científico también se realiza en aguas continentales. José Leonardo Chacón Monge y colegas, en el capítulo 17, nos resumen los avances de buceo científico en el *Proyecto BioMar-ACG* desde otro punto caliente de gran generación de conocimiento científico marino: Costa Rica.

Los procedimientos de buceo científico avanzan constantemente no solo por las nuevas ofertas tecnológicas, sino por la incursión de la actividad en la construcción de tejido social. En esa dirección, Arturo Hernández Velasco y colegas, en el capítulo 18 presentan una nueva especialidad de buceo para el monitoreo de agregaciones reproductivas de peces como una herramienta de conservación y ecoturismo. Una forma de crear un puente entre el buceo científico, las comunidades y el público en general. El buceo científico se ha beneficiado enormemente de las diferentes asociaciones de buceo que han masificado y simplificado su enseñanza.

Para la consecución de datos científicos se requiere de una constante optimización y una rigurosa experimentación; una muestra de ello la podemos leer en el capítulo 19 donde Ana M. Palacio Castro y Fernando A. Zapata nos muestran sus avances comparando tres métodos para el estudio de las comunidades bentónicas sésiles en arrecifes coralinos. Natalia Rivas Escobar y colegas nos introducen, en el capítulo 20, en el estéreo-video operado por buzos como una herramienta nueva y emergente para realizar estudios comparativos de tallas de peces marinos. En el capítulo 21, Alejandra Puentes Sayo y colaboradores, nos exponen las técnicas letales y no letales con las que han estudiado comunidades de peces marinos en Colombia. Desde los confines más remotos del Pacífico oriental tropical, Sandra Bessudo y Felipe Ladino Archila en el capítulo 22 nos comparten las técnicas para el marcaje y seguimiento de tiburones. Phanor H Montoya Maya en el capítulo 23, expone los métodos para el levantamiento de fottomosaicos para el monitoreo ecológico de arrecifes coralinos. Catalina Gómez Cubillos y colegas en el capítulo 24 presentan sus estudios sobre las interacciones entre corales masivos y otros organismos bentónicos. En el capítulo 25, Juan A. Sánchez y Luisa F. Dueñas, resumen las técnicas para el marcaje y monitoreo de octocorales, “bosques de animales”, utilizados en diversos estudios tanto en el Caribe como el Pacífico colombiano.

El buceo técnico impone aún muchos retos en la seguridad para convertirse en una herramienta masiva del buceo científico, como lo es el buceo recreativo. Pese a esto, varios grupos de investigación en la región hacen uso de estas

técnicas incluyendo los recirculadores. En el capítulo 26, Juan A. Sánchez y colegas nos resumen su experiencia en las primeras exploraciones directas de los ecosistemas coralinos mesofóticos (30 -120 m) mediante buceo técnico de circuito cerrado (CCR-Trimix). Aunque entre sus recomendaciones está el paso a tecnologías de vehículos operados remotamente (ROV) por razones de seguridad, la tecnología que construye estos equipos está en constante mejoramiento y se espera una oferta de equipos cada vez más seguros en los próximos años. El buceo técnico no debe perderse de vista en el buceo científico.

Las especies invasoras son un problema mayor que ocasiona el deterioro de los ecosistemas marinos. Un tema de gran relevancia para el buceo científico actual. Karla Jaramillo de Ecuador nos presenta en el capítulo 27 el programa de monitoreo del coral invasor *Carijoa riisei*, conocido comúnmente como coral copo de nieve, en el Pacífico Oriental Tropical. El manejo de una especie invasora, que puede propagarse fácilmente por fragmentación como el *Carijoa riisei*, dificulta enormemente su manejo. Los métodos de adquisición de imágenes para el monitoreo del fondo marino presentados en este y otros capítulos anteriores, ofrecen trazabilidad y rigurosidad hacia la toma de decisiones sobre el manejo de los ecosistemas marinos y costeros.

Finalmente, creemos que un paso natural luego de la publicación de este manual es buscar un encuentro regional para compartir avances en el buceo científico, seguido por una actualización de técnicas y procedimientos. Ante todo, queremos que el buceo científico sea una actividad segura y que se masifique en la educación superior en Latinoamérica. Este manual es un primer paso hacia estas dos metas.

## **Bibliografía**

1. Misión Internacional de Sabios. *Colombia hacia una sociedad del conocimiento: Reflexiones y propuestas*. vol. I (Vicepresidencia de República de Colombia, 2020).
2. Franco-Herrera, A. et al. *Colombia, la oportunidad del agua: dos océanos y un mar de ríos y aguas subterráneas: Propuestas del foco de Océanos y recursos hidrobiológicos*. (2020).
3. Heine, J. N. *Scientific diving techniques: a practical guide for the research diver*. Preprint at (2009).
4. Flemming, N. C. & Max, M. D. *Code of practice for scientific diving: principles for the safe practice of scientific diving in different environments*. 251 (1988).
5. AAUS. *Standards for scientific diving, certification and operation of scientific diving programs*. Preprint at (2003).

6. Sayer, M. D. *NOAA Diving Manual: diving for science and technology*. (NOAA).
7. Corado-Nava, N. A. & Hernández-Díaz, Y. Q. *Buceo científico en México: buceadores, formación y aplicaciones*.
8. Goreau, T. F. *The ecology of Jamaican coral reefs I. Species composition and zonation*. *Ecology* 40, 67–90 (1959).
9. Geister, J. *The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs*. in *Proceedings of the 3rd International Coral Reef Symposium, 1977* vol. 1 23–29 (1977).
10. Geister, J. *Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia* (Western Caribbean Sea, Colombia). *Facies* 27, 1–69 (1992).
11. Díaz, J. M. et al. *Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. I. Archipiélago de San Andrés y Providencia*. (1996).



# 1

## Física y Buceo

---

Isabel Cristina Hoyos Rincón\*

---

El océano es una fuente de enorme conocimiento y fascinación para el hombre. Sin embargo, adentrarnos en las profundidades marinas es un reto tanto biológico como tecnológico, pues el cuerpo humano está adaptado a vivir en la superficie terrestre. Nuestras funciones biológicas vitales como respirar, observar, hablar, escuchar o movernos, entre otras, experimentan cambios funcionales al adentrarnos en el medio marino. La realización segura y cómoda del buceo requiere un buzo bien informado y consciente de los límites que le impone el medio acuático. En este capítulo presentamos los fenómenos físicos más importantes que se experimentan en diferentes modalidades de buceo.

### Características termodinámicas del aire

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que envuelve nuestro planeta y tiene una extensión vertical de unos 100 km. Sus propiedades y su composición han evolucionado paralelamente con la tierra y el océano alcanzando las condiciones necesarias para la emergencia de la vida<sup>[1, 2]</sup>. El aire está compuesto principalmente por nitrógeno (79 %), oxígeno (20 %) y otros gases (1 %) como el argón, el dióxido de carbono, el vapor de agua, el neón, el helio, el metano, el hidrógeno y el ozono. Aunque la composición del aire es bastante estable, la proporción de sus componentes presenta ciertas variaciones debidas tanto a procesos naturales como a procesos antrópicos. Por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, derivados de nuestros procesos

---

\* Profesora Asociada, programa de Física. Universidad del Quindío. email: ichoyos@uniquindio.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0001-5178-0447>

productivos y formas de consumo están alterando de manera significativa los procesos climáticos del planeta tierra y hoy estamos frente a un inminente estado de cambio climático, ambiental y estructural de la vida y los ecosistemas<sup>[3]</sup>.

Para los procesos que nos interesan en relación con el buceo, el aire se aproxima bastante bien a un gas ideal, un sistema compuesto por una colección de partículas puntuales que se mueven libremente sin interacción mutua (es decir, sin fuerzas de atracción intermoleculares) y el intercambio de energía y *momentum* entre las partículas sólo es posible mediante colisiones instantáneas<sup>[4]</sup>. Esta aproximación nos permite comprender ciertos fenómenos en un contexto termodinámico mediante la caracterización de las variables de estado macroscópicas como: la temperatura, la presión, el volumen y la densidad.

La temperatura ( $T$ ) es la variable más intuitiva y cercana a nuestra experiencia sensible. En una definición instrumental podríamos decir que la temperatura es lo que miden los termómetros. La teoría cinética de los gases describe la temperatura como una medida del grado de movilidad o de energía cinética que portan las partículas en movimiento, de modo que la temperatura es una expresión macroscópica de la cinética microscópica del colectivo de partículas. Entre mayor sea la temperatura de un sistema diremos que mayor es la intensidad del movimiento microscópico de las partículas.

La presión ( $p$ ) es una cantidad física que resume el intercambio de *momentum* de las partículas con las paredes del recipiente que las contiene o en la interfaz con otro medio material, por ejemplo, en la interfaz agua aire. La presión se transmite o se ejerce sobre un sistema a través de sus fronteras. En términos matemáticos la presión se define como la distribución superficial de la fuerza perpendicular de magnitud  $F$  (en Newtons, N) que se ejerce a través de la superficie de área  $A$ :

$$p = \frac{F}{A}$$

El volumen ( $V$ ) es la cantidad geométrica que determina el espacio que ocupa un cuerpo. Para un gas el volumen quedará determinado por las dimensiones de su contenedor. En los sólidos regulares el volumen se determina mediante fórmulas matemáticas sencillas. Para cuerpos irregulares podemos acudir a estimaciones (por ejemplo, suponer que un cuerpo humano se aproxima a un cilindro) o mediciones directas (por ejemplo, sumergiendo el objeto en

un líquido con una densidad similar de modo que el volumen desplazado corresponda con el volumen del objeto).

La densidad ( $\rho$ ) es una cantidad que expresa la relación entre la masa  $m$  del cuerpo y el volumen  $V$  que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Un cuerpo será más denso que otro si la masa contenida en el mismo volumen es mayor y viceversa. Análogamente, un cuerpo será más denso que otro si la misma masa ocupa un volumen menor. En general, una sustancia en estado gaseoso ocupa un volumen unas 1000 veces mayor que la misma cantidad de materia en estado líquido.

**Tabla 1.**

Unidades para variables termodinámicas comunes en el campo del buceo. Las unidades que corresponden al Sistema Internacional de unidades (SI) se resaltan en negrilla.

Variable	Unidades	Algunos ejemplos
Temperatura	<b>K: Kelvin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Punto de congelación del agua: 273,15 K = 0 °C = 32 °F</li> </ul>
	°C: grados Centígrados o Celsius	<ul style="list-style-type: none"> <li>Punto de ebullición del agua: 373,15 K = 100 °C = 212 °F</li> <li>Temperatura del cuerpo humano: 37 °C</li> </ul>
	°F: grados Fahrenheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura promedio del mar tropical: 27°C</li> </ul>
Presión	<b>Pa: Pascal</b> [Newton / metro <sup>2</sup> ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Presión atmosférica a nivel del mar: 1 atm = 101.325 Pa = 14,7 psi = 750 mmHg</li> <li>Una atmósfera de presión equivale a 10 metros (33 pies) de agua de mar.</li> <li>Presión parcial del nitrógeno a nivel del mar: 80.047 Pa = 0,79 atm</li> </ul>
	psi: [libra-fuerza / pulgada <sup>2</sup> ]	
	atm: Atmósfera	
	bar = 10 <sup>5</sup> Pa	
	mmHg: Milímetros de mercurio	
Masa	<b>kg: kilogramo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 kg = 1000 g = 2,2 lb = 35,3 oz</li> </ul>
	g: gramo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un litro de agua tiene una masa de 1 kg</li> </ul>
	lb: libra	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una mol contiene 6,02 x 10<sup>23</sup> partículas de una sustancia determinada, la masa contenida en una mol de agua es 18 g</li> </ul>
	oz: onza	

<b>Densidad</b>	<b>kg / m<sup>3</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad del agua dulce: 1000 kg / m<sup>3</sup> = 1 kg/l = 62,4 lb / pie<sup>3</sup></li> </ul>
	kg / l	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad promedio del agua de mar: 1025 kg / m<sup>3</sup> = 1,025 kg/l = 64 lb / pie<sup>3</sup></li> </ul>
	lb / pie <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad promedio del cuerpo humano: 0,93 kg/l = 0.93 g/cm<sup>3</sup></li> </ul>
	g / cm <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densidad promedio del aire en la superficie terrestre: 1,3 Kg/m<sup>3</sup></li> </ul>

En la Tabla 1 se presentan las unidades de estas variables en el Sistema Internacional de unidades (SI) y en otras unidades comunes en el campo del buceo.

Las variables macroscópicas que definen el estado termodinámico de una sustancia gaseosa se relacionan entre sí siguiendo leyes empíricas que se formularon a lo largo de los siglos XVI y XVII [4, 5]:

- Ley de Boyle-Mariotte: si la temperatura se mantiene constante, el volumen es inversamente proporcional a la presión:

$$p \sim \frac{1}{V}$$

- Ley de Charles: si la presión se mantiene constante, la temperatura es directamente proporcional al volumen:

$$T \sim V$$

- Ley de Gay-Lussac: Si el volumen se mantiene constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura:

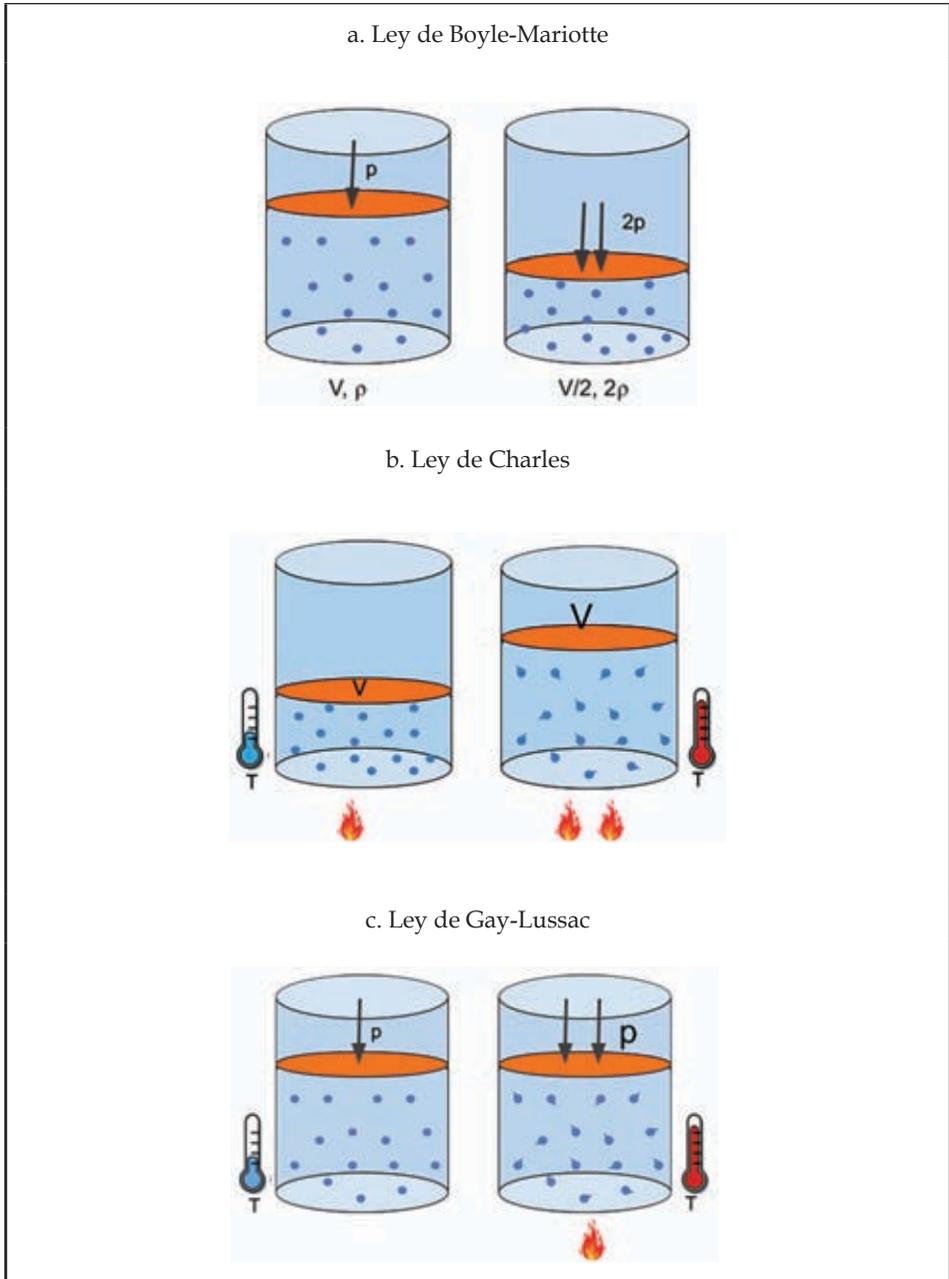
$$p \sim T$$

Estas tres relaciones empíricas se sintetizan en la ecuación de estado del gas ideal:

$$pV = N R T$$

con  $N$  el número de moles que contiene la sustancia y  $R = 8.314 J K^{-1} mol^{-1}$ , la constante del gas ideal. A presiones por debajo de las 20 atm, la ecuación de estado del gas ideal describe bastante bien las observaciones experimentales entre  $p$ ,  $V$  y  $T$  para la mayoría de los gases, sin cambio de estado. Por fuera del rango de validez de la ecuación de estado del gas ideal, donde se hace necesario incluir otras propiedades de la materia como su estructura interna, el tamaño de las partículas y las fuerzas de interacción intermoleculares, existen ecuaciones de estado alternativas como la ecuación de estado de

van der Waals, de Berthelot, de Dieterici, del virial y de Redlich-Kwong, entre otras <sup>[4]</sup>.



**Figura 1.** Leyes empíricas de los gases

Para el propósito de la presente discusión y con fines pedagógicos nos limitaremos a la ecuación de estado del gas ideal para la descripción del comportamiento del aire bajo presión.

De acuerdo con la Ley de Dalton, una mezcla gaseosa compuesta por un número  $k$  de gases ideales, la presión parcial  $p$  de cada componente corresponde a la ecuación de estado de gas ideal:

$$p_k V_k = N_k R T_k$$

Además, corresponde con la contribución fraccional dentro de la mezcla, de modo que la presión total de la mezcla se puede escribir como la suma de las presiones parciales ( $pp$ ) de sus componentes:

$$p = \sum_k pp_k$$

A nivel del mar la presión atmosférica corresponde al peso de una masa de 1 kg distribuida homogéneamente en una superficie de 1 cm<sup>2</sup>, o equivalentemente a una atmósfera (at).

El aire se puede considerar como un gas ideal compuesto en un 79% de nitrógeno, un 20% de oxígeno y un 1% de otros gases. De modo que la presión parcial del nitrógeno es  $pp_{\text{nitrógeno}} = 0,79 \times 1 \text{ atm} = 0,79 \text{ atm}$ , mientras que la presión parcial del oxígeno es  $pp_{\text{oxígeno}} = 0,20 \times 1 \text{ atm} = 0,20 \text{ atm}$  y la presión parcial de los otros gases será de 0,01 atm. Si duplicamos la presión de una masa de aire, entonces las presiones parciales de sus componentes también se duplican:

$$pp_{\text{nitrógeno}} = 0,79 \times 2 \text{ atm} = 1,58 \text{ atm}$$

$$pp_{\text{oxígeno}} = 0,20 \times 2 \text{ atm} = 0,40 \text{ atm}$$

$$pp_{\text{otros gases}} = 0,01 \times 2 \text{ atm} = 0,02 \text{ atm}$$

## El cuerpo humano en el medio acuático

Una sustancia en estado líquido se diferencia macroscópicamente del estado gaseoso en las cualidades de sus variables. Por ejemplo, la densidad de la misma cantidad de materia de una sustancia en estado gaseoso es unas 1000 veces menor que la densidad en estado líquido. El estado líquido es esencialmente incompresible en un amplio rango de presiones, lo que significa que su volumen permanece prácticamente invariable bajo un cambio de la presión o la temperatura.

Si pensamos en el mar como un fluido en equilibrio hidrostático<sup>[6]</sup> y consideramos una columna delgada de agua de masa  $m$  y base de área  $A$ , la sumatoria

de fuerzas estará balanceada. En las direcciones horizontales las propiedades de la presión son homogéneas a la misma profundidad y se cancelan entre sí. En la dirección vertical además de las fuerzas de presión tenemos la gravedad terrestre. En este caso el balance de fuerzas se escribe como:

$$\Sigma F = F_s + F_g + F_b = -p_o A - mg_o + pA = 0$$

donde  $F_s$  es la fuerza de presión que ejerce la atmósfera en la superficie del agua,  $F_g = mg_o$  es la fuerza de gravedad (o el peso) que ejerce la tierra sobre la columna de agua,  $F_b$  es la fuerza de presión que ejerce el fondo marino en la base de la columna de agua y  $g_o = 9.8 \text{ m s}^{-2}$  es la aceleración de la gravedad terrestre. Considerando que la densidad del agua es constante ( $\rho_{H_2O}$ ) se puede reescribir la masa de la columna de agua como:

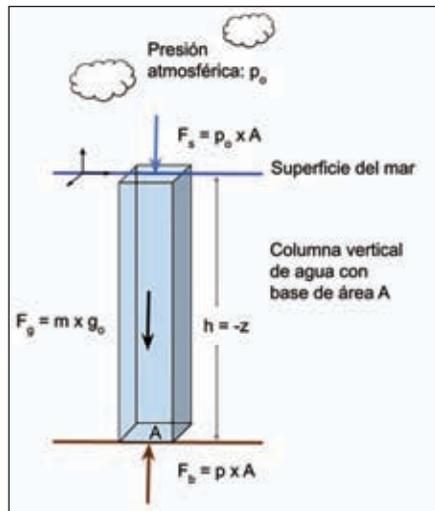
$$m = \rho_{H_2O} V = \rho_{H_2O} A h$$

Despejando la presión de la ecuación de balance hidrostático:

$$p = p_o + \rho_{H_2O} h g_o$$

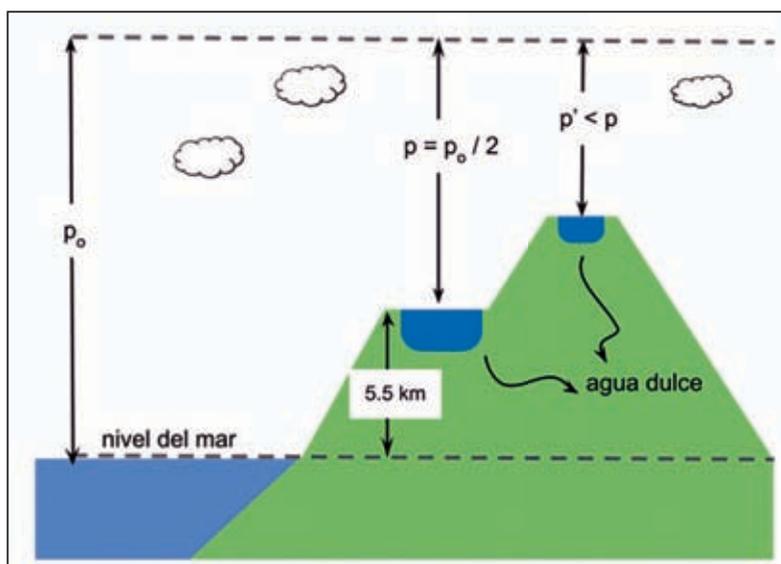
Para obtener una forma generalizada de la presión hidrostática a cualquier profundidad reemplazamos  $h$  por  $-z$ , pues de acuerdo con el sistema de referencia la profundidad crece en dirección  $z$  negativa de modo que la presión en función de la profundidad es:

$$p(z) = p_o - \rho_{H_2O} g_o z$$



**Figura 2.** Modelo mecánico del mar incompresible. Diagrama de fuerzas para una columna de agua en equilibrio hidrostático.

La presión hidrostática en el mar depende linealmente de la profundidad, con pendiente  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} g_0 \cdot 10^4 \text{ Pa m}^{-1} = 1 \text{ atm}/10 \text{ m}$ , lo que quiere decir que descender 10 metros en el mar ( $z = -10 \text{ m}$ ) es equivalente a aumentar la presión total en 1 atmósfera de presión. En términos prácticos, se acostumbra a dividir la presión total en presión atmosférica y presión hidrostática y se usan las *atas*<sup>1</sup> como unidad para referirse a la presión absoluta. La presión hidrostática aumenta a una tasa de 1 atmósfera por cada 10 metros de profundidad y la presión atmosférica va disminuyendo de acuerdo con la elevación del lugar donde nos encontremos. Existen varias aproximaciones que nos permiten modelar el comportamiento de las variables de estado atmosféricas en función de la elevación, por ejemplo, la atmósfera isotérmica, la atmósfera adiabática o la atmósfera estándar de 1976<sup>[6]</sup>. Estos modelos nos permiten estimar variables como la densidad, la temperatura y la presión en condiciones de equilibrio hidrostático. En general, la temperatura sigue una relación lineal con la elevación mientras que la presión atmosférica sigue una relación no-lineal cuasi exponencial.



**Figura 3.** Variación de la presión atmosférica con la elevación.

1 La unidad de medida para la presión *ata* no constituye una medida aceptada en la física, pero es comúnmente usada entre los buzos para referirse a la presión total o absoluta, compuesta por la presión hidrostática más la presión atmosférica.

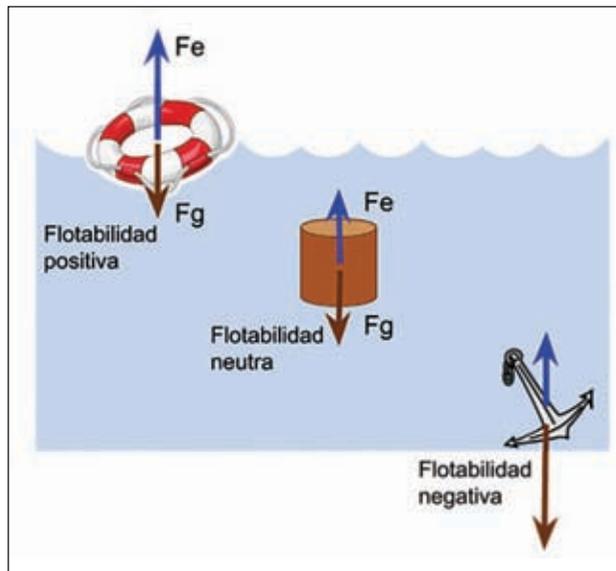
A unos 5500 m de elevación encontramos que la presión atmosférica se ha reducido a la mitad de la presión a nivel del mar (Figura 3). Estos factores se volverán relevantes en la planificación de buceo de altura.

Al sumergirnos en el agua experimentamos efectos inmediatos por el aumento de la presión y la densidad del medio acuático [7, 8, 9, 10], por ejemplo, la flotabilidad, el aumento de la presión sobre las cavidades aéreas del cuerpo, diferencias en la transmisión de la luz y el sonido respecto al aire y una acelerada pérdida del calor corporal, entre otros.

### *La flotabilidad*

La flotabilidad se explica mediante el **principio de Arquímedes** que nos dice que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza adicional a la fuerza de la gravedad conocida como empuje o flotabilidad<sup>[6]</sup>. Esta fuerza la ejerce el medio fluido a través de la superficie del cuerpo (fuerza de superficie o de presión), su magnitud corresponde con el peso del fluido desplazado y va en dirección contraria a la acción de la gravedad (Figura 4). La fuerza total que experimenta el cuerpo dependerá del balance entre la fuerza del empuje  $F_e$  y la gravedad  $F_g$ :

$$F = F_e - F_g$$



**Figura 4.** Tipo de flotabilidad de acuerdo con el balance entre la fuerza de gravedad y el empuje.

Si el empuje es mayor que la fuerza de gravedad el cuerpo permanece flotando en la superficie y el buzo tendrá dificultades para sumergirse en el agua (flotabilidad positiva). Si la fuerza de gravedad es mayor que el empuje del cuerpo se hundirá rápidamente y el buzo tendrá dificultades para mantenerse a flote en la superficie (flotabilidad negativa). Si la fuerza de gravedad y el empuje se balancean entonces el buzo se ubica y se mueve con facilidad en el agua (flotabilidad neutra).

En general, las características de la flotabilidad del buzo dependen de la densidad de su cuerpo en relación con el agua. Sin embargo, la práctica del buceo requiere portar equipo especializado que se convierte en parte esencial del cuerpo del buzo pues funciona como extensión de su propio cuerpo. El equipo del buzo también debe considerarse en la determinación de la flotabilidad del buzo y en caso de ser necesario debe ajustarse con el fin de mantener una flotabilidad neutra durante toda la inmersión. Lo usual es portar pastillas de lastre distribuidas de manera uniforme a lo largo de un cinturón o en los compartimentos del chaleco destinados para tal fin. En una inmersión con equipo autónomo de circuito abierto, el consumo del aire hará que la densidad del equipo cambie durante la inmersión induciendo cambios en la flotabilidad del buzo. El buzo debe anticipar y estar preparado para manejar estos cambios potenciales en su flotabilidad. Las condiciones de densidad del agua también deben considerarse en la planificación del buceo, por ejemplo, el agua de mar es un poco más densa que el agua dulce, lo que requerirá ajustes adicionales respecto a una práctica en piscina o una inmersión en un lago.

### ***Consecuencias del aumento de la presión ambiente en las cavidades aéreas***

El cuerpo humano está adaptado a vivir en la superficie terrestre, la presión atmosférica se distribuye de manera homogénea sobre el cuerpo. Los órganos y tejidos internos se encuentran en equilibrio respecto a la presión atmosférica. Cuando descendemos en el agua la presión hidrostática aumenta 1 atmósfera de presión por cada 10 metros de profundidad (Tabla 2).

De acuerdo con la ley de Boyle, una compresión conlleva a una reducción en el volumen a temperatura constante (en condiciones normales podemos decir que el cuerpo humano mantiene una temperatura constante de 37°C). El cuerpo humano se compone de diversos tejidos, los cuales podemos clasificar de manera cualitativa en sólidos (como los huesos y los músculos), líquidos (como la sangre y los fluidos corporales) y gaseosos (como el aire). Las cavidades aéreas del cuerpo humano son altamente sensibles al efecto

**Tabla 2.** Variación del volumen y la densidad al aumentar la presión ambiente, de acuerdo con la ley de Boyle.

Profundidad (m)	Presión hidrostática (atm)	Presión absoluta (ata)	Volumen	Densidad
0	0	1	V	$\rho$
10	1	2	V/2	$2\rho$
20	2	3	V/3	$3\rho$
50	5	6	V/6	$6\rho$
90	9	10	V/10	$10\rho$

del aumento de la presión en el medio acuático y la sensación de compresión en órganos como los oídos y los senos paranasales es evidente durante el descenso en el agua, incluso puede llegar a ser doloroso. Para compensar el efecto de la presión el buzo debe realizar maniobras de compensación que equilibren la presión interna con la presión externa, por ejemplo, la maniobra de Valsalva o la maniobra de deglución se usan para conducir aire de los pulmones a las cavidades aéreas que conectan los conductos auditivos y los senos paranasales, equilibrando la presión interna con la presión externa. Como la presión cambia de manera continua con la profundidad, el buzo experimentará una compresión continua a lo largo del descenso que debe compensarse de manera oportuna para evitar un daño fisiológico o ruptura de tejidos. Durante el ascenso, la presión hidrostática disminuye y en condiciones normales la presión interna se libera automáticamente sin necesidad de realizar alguna maniobra adicional. Si el buzo está resfriado o el buceo se desarrolla en aguas muy frías, puede haber mucosidades que impidan el flujo del aire para realizar de manera correcta las maniobras de equilibrio de presiones, provocando que el buzo corra el riesgo de sufrir un barotrauma (trauma o daño en algún órgano del cuerpo por presión).

Los pulmones también son órganos sensibles al cambio de presión en el agua, pero su comportamiento depende del tipo de buceo que se realice. En un buceo a pulmón libre o apnea, el buzo hace descensos repetidos conteniendo el aire que toma en la superficie. Si la profundidad del descenso está dentro de los límites fisiológicamente seguros, los pulmones del buzo se asemejan a una cámara elástica, cambiando su volumen consistente con la presión del medio acuático. Aunque la analogía con un globo elástico es útil en términos pedagógicos, los pulmones son órganos con una estructura compleja al igual que sus propiedades elásticas. A grandes profundidades el aumento de la

presión puede ser tal que los pulmones estén en riesgo de colapsar. En este caso se activa un mecanismo automático de protección que consiste en el desplazamiento de la sangre hacia la cavidad torácica para evitar el colapso de los pulmones, este mecanismo se conoce como *blood shift*<sup>[11, 12]</sup>. En el buceo autónomo con equipo SCUBA, el regulador entrega aire a demanda a presión ambiente, lo que significa que durante toda la inmersión los pulmones no cambian su volumen. Un buzo que realiza una inmersión a pulmón libre nunca deberá recibir aire comprimido de un equipo autónomo durante una inmersión, pues corre el riesgo de una sobreexpansión pulmonar durante el ascenso.

Con el equipamiento, el buzo incorpora otras cavidades aéreas a su cuerpo. Por ejemplo, entre la careta (o máscara) y el rostro del buzo hay una cámara de aire que también es sensible a los cambios de presión. Cuando hay un aumento de la presión el aire se comprime trasladando este aumento sobre el rostro del buzo. Para evitar que dicho aumento cause daños, como la ruptura de los vasos sanguíneos en ojos y nariz, el buzo deberá igualar la presión en el interior de la careta durante el descenso, insuflando un poco de aire por la nariz.

### *Óptica subacuática*

Al abrir los ojos bajo el agua no vemos más que imágenes difusas e indistinguibles, nuestro sistema de visión está calibrado para interpretar la luz que viene directamente a través del aire. La careta se encarga de crear ese espacio aéreo alrededor de nuestros ojos para recobrar la visión bajo el agua. Sin embargo, la trayectoria que recorre la luz bajo el agua sufre varios procesos debidos al cambio de medio, lo que modifica un poco la forma como percibimos los objetos que observamos en el buceo. La luz que llega a la superficie de la tierra proviene del sol. La luz visible corresponde al rango del espectro electromagnético con longitudes de onda entre los 400 y los 750 nm, que corresponden a los colores rojo y violeta, respectivamente. Al penetrar en el agua, la luz es absorbida progresivamente a medida que aumenta la profundidad. Los componentes de onda larga como los rojos y naranjas desaparecen en los primeros 15 metros de profundidad, mientras que los azules y violetas desaparecen a los 60 metros. A una profundidad de 30 metros el paisaje marino se ve en un tono azul grisáceo muy homogéneo, de modo que para recuperar los colores debemos iluminar con una fuente de luz extra como una linterna de buceo. La tasa de absorción de la luz varía dependiendo de la transparencia y temperatura del agua y la oscuridad absoluta se alcanza a unos 500 metros de profundidad.

Antes de llegar a nuestros ojos la luz sufre múltiples refracciones y reflexiones, que se pueden entender como desviaciones de la trayectoria de la luz, las cuales son producidas por una disminución en su velocidad de propagación al cambiar de un medio menos denso como el aire (donde viaja a una velocidad de  $300.000 \text{ kms}^{-1}$ ) a un medio más denso como el agua (donde viaja a una velocidad de  $230.000 \text{ kms}^{-1}$ ) y viceversa. Antes de llegar a nuestros ojos la luz cruza la superficie del agua pasando del aire al agua, luego a través del vidrio de la careta (que es más denso que el agua) y, por último, cruza la cámara de aire que encierra la careta antes de llegar finalmente a nuestros ojos. Con una careta típica de lentes de vidrio templado, la distorsión de las imágenes es aproximadamente un medio más grande y un cuarto más cerca. La distorsión puede variar significativamente al usar caretas con lentes plásticos u otras composiciones.

Si el medio acuático es muy turbio o si tiene mucho material disuelto, las partículas suspendidas en el agua funcionan como difusores de la luz, haciendo que el haz se bifurque y siga caminos erráticos, lo que mengua significativamente la visibilidad.

### *Propagación del sonido bajo el agua*

La velocidad de propagación de las ondas mecánicas como el sonido depende de las propiedades elásticas, la densidad y la temperatura del medio material. La velocidad media de propagación del sonido en el agua de mar es de  $1500 \text{ ms}^{-1}$  (en el agua dulce es ligeramente menor,  $1450 \text{ ms}^{-1}$ ), unas 4.5 veces la velocidad de propagación del sonido en el aire. Este hecho tiene implicaciones prácticas en el buceo ya que la diferencia con la que llegan las ondas sonoras a cada uno de nuestros oídos se vuelve difícil de resolver en nuestro cerebro. La señal se interpreta como si llegase simultáneamente a ambos oídos, perdiendo el mecanismo que nos sirve para localizar espacialmente la fuente que produce el sonido. Es común sentirse desorientado cuando escuchamos sonidos bajo el agua. El buzo debe estar especialmente atento cuando se encuentra buceando en una zona con tráfico de lanchas o cerca de instalaciones acuáticas.

### *Transferencia de calor*

Es un sistema compuesto por dos subsistemas a diferente temperatura, el calor fluye espontáneamente del de mayor temperatura hacia el de menor temperatura hasta llegar al equilibrio térmico. Este comportamiento es esencialmente irreversible, lo que significa que la dirección en la que se da la

transferencia de calor queda determinada por la diferencia de temperatura. Cuando nos sumergimos en el mar recreamos esta situación física donde el subsistema de mayor temperatura es el cuerpo del buzo (a una temperatura de 37°C) y el sistema de menor temperatura es el océano (un enorme sumidero con una temperatura promedio de 27°C en la región tropical). El cuerpo humano puede pensarse como una compleja máquina termodinámica que mantiene su temperatura constante gracias a la transformación metabólica de azúcares en energía<sup>2</sup>. En el aire la liberación de calor al ambiente se realiza a una tasa de unos 200 J s<sup>-1</sup> y en el agua la transferencia de calor es unas 20 veces mayor. De manera que una exposición prolongada del buzo en el agua puede llevar a una situación en la cual el cuerpo pierda calor a una tasa mayor de la que puede producirlo, llegando a una condición de hipotermia que puede alterar las funciones básicas vitales del cuerpo humano. En la práctica del buceo se suele utilizar trajes de neopreno o trajes térmicos que ayudan a limitar la pérdida de calor para la realización de un buceo más cómodo y seguro.

La temperatura del agua depende de factores diversos como la ubicación geográfica del lugar, las condiciones climáticas y ambientales, la temporada del año, las corrientes y la profundidad. Estos factores pueden ser factores críticos que el buzo necesita tener en cuenta en la planificación del buceo y determinar el equipo necesario de acuerdo con las condiciones de la inmersión.

## **Respirando aire comprimido**

El equipo SCUBA nos permite prolongar nuestro tiempo bajo el agua gracias a que portamos una fuente de aire (u otras mezclas de gases respirables como el NITROX o el TRIMIX). El aire que se almacena en el tanque de buceo es aire que se va introduciendo paulatinamente en la botella por medio de un compresor. De hecho, en el buceo es más común hablar del contenido de aire en la botella en términos de la presión a la que se encuentra el gas que del volumen o la cantidad de materia. Por medio del regulador podemos respirar el aire de la botella a demanda a presión ambiente, de modo que entre más profundo nos encontremos respiraremos aire a mayor presión. Este aire a presión se disuelve en los tejidos de nuestro cuerpo a través del intercambio gaseoso que se da a través del sistema respiratorio.

Una disolución se da cuando tenemos una mezcla homogénea de dos sustancias que no reaccionan químicamente entre sí<sup>[4]</sup>. Por ejemplo, cuando

---

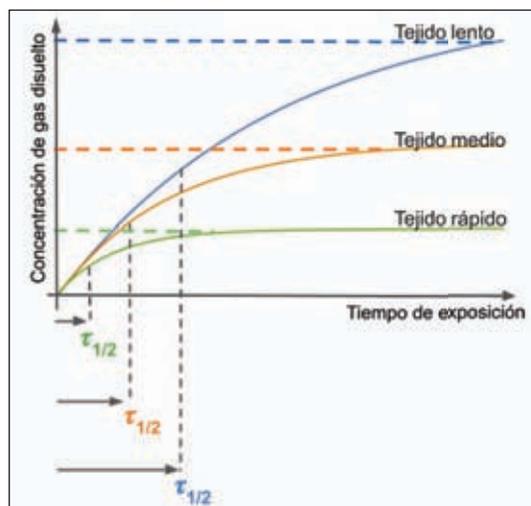
2 En el Sistema Internacional de unidades la energía se mide en Joules (J).

agregamos azúcar al café y lo revolvemos con una cuchara obtenemos una mezcla homogénea de ambas sustancias. Una situación similar ocurre cuando respiramos aire a presión durante el buceo. Recordemos que el aire está compuesto principalmente de nitrógeno (79%) y oxígeno (20%). Parte del oxígeno del aire se consume en el proceso metabólico regular, mientras que el nitrógeno no cumple ninguna función metabólica. Podríamos decir que no reacciona químicamente en nuestro cuerpo.

En 1803 William Henry encontró que a temperatura constante, la cantidad de gas que se disuelve en un líquido es proporcional a la presión parcial a la que se encuentra el gas. A esto se le conoce como la ley de Henry<sup>[4]</sup>. Si la temperatura a la cual se da el proceso disminuye, la cantidad de gas que se disuelve a la misma presión será mayor. Mientras el buzo desciende respirando aire comprimido el aire se va disolviendo de manera homogénea en los tejidos, pero como existe una asimetría metabólica entre el nitrógeno y el oxígeno, el gas que se disuelve en los tejidos es principalmente nitrógeno. A medida que el buzo asciende (e incluso un tiempo posterior a la inmersión) el gas disuelto se irá liberando por medio de la respiración.

En 1908, John S. Haldane, quien es considerado el precursor de la teoría de la descompresión, propuso un modelo para explicar el mecanismo de absorción de nitrógeno en el buceo<sup>[13]</sup>. La absorción de nitrógeno se da de manera diferencial en los tejidos del cuerpo humano y evoluciona exponencialmente de acuerdo con la ecuación de difusión hasta alcanzar la saturación. Punto a partir del cual el tejido no puede absorber más nitrógeno. En la teoría de Haldane, el cuerpo humano se puede pensar como un conjunto de compartimentos los cuales se clasifican en lentos, medios o rápidos de acuerdo con la velocidad de absorción del nitrógeno y representan los diferentes tejidos del cuerpo. En general, la velocidad de absorción depende principalmente de dos factores: la densidad del tejido y el grado de irrigación sanguínea (perforación). El tejido adiposo y los huesos son tejidos lentos, los músculos son tejidos medios mientras que la sangre es una sustancia de absorción rápida. El comportamiento de un compartimento particular se puede caracterizar por el tiempo necesario para alcanzar el tiempo de vida media (o tiempo medio,  $\tau_{1/2}$ ), que corresponde al tiempo que tarda el tejido en alcanzar el 50% de su punto de saturación (Figura 5).

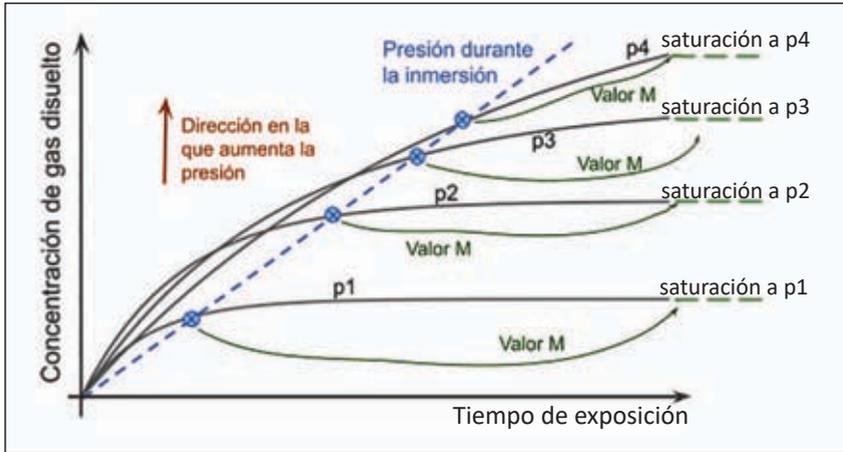
Se considera que el tejido alcanza la saturación cuando lleva un tiempo de exposición de 6 veces el tiempo medio. Es claro que cuando ha pasado un cierto tiempo de inmersión a la misma profundidad, los diferentes tejidos del cuerpo se encuentran en niveles distintos de saturación de nitrógeno. Puede



**Figura 5.** Curvas de concentración del gas disuelto para diferentes tejidos. La velocidad de absorción de gas en el tejido se caracteriza por el tiempo medio  $\tau_{1/2}$ . La saturación del tejido se alcanza en un tiempo de exposición equivalente a  $6 \tau_{1/2}$

ocurrir que mientras los tejidos rápidos están saturados, los tejidos lentos estén lejos de alcanzar el nivel de saturación. Mientras el buzo desciende o asciende va cambiando la presión a la cual se realiza el proceso de difusión en su cuerpo, lo que equivale a moverse a través de la familia de curvas exponenciales para cada tipo de compartimento. De modo que a cada profundidad le corresponde un valor máximo de saturación conocido como valor  $M^{[14, 15]}$  (Figura 6).

Al realizar un buceo en el umbral de saturación o sobresaturación se corre el riesgo de que un cambio abrupto de la presión, como el que se podría presentar durante un ascenso descontrolado, produzca la liberación de burbujas de aire que se mueven descontroladamente a través de los tejidos y el torrente sanguíneo con el riesgo potencial de ocasionar una enfermedad descompresiva. Para realizar un buceo dentro de un rango de no descompresión es necesario limitar la profundidad, el tiempo de la inmersión y la velocidad del ascenso. Esta información se incorpora en modelos o algoritmos que se encargan de determinar los límites de tiempo, profundidad, paradas de seguridad y velocidades de ascenso para la planeación del buceo junto con los intervalos de superficie entre inmersiones sucesivas, necesarios para permitir la liberación paulatina del nitrógeno acumulado en los tejidos. Hoy día estos modelos son muy refinados e incluyen hasta 16 compartimentos diferentes



**Figura 6.** Familia de curvas de la concentración del gas disuelto para el mismo compartimento a diferentes presiones (profundidades). Cuando el buzo cambia su profundidad, es equivalente a moverse a través de las curvas de concentración de acuerdo a la presión, por lo que su valor M cambia en el tiempo.

(por ejemplo, el algoritmo ZHL16 de Bühlmann de 1984<sup>[16]</sup>) cuyas propiedades de absorción de nitrógeno se determinan utilizando datos estadísticos de una muestra amplia y diversa de personas, con el fin de contener tanta variabilidad como sea posible. Las tablas y los computadores de buceo presentan la información que se obtiene de estos modelos de una forma práctica y sencilla.

En los avances más recientes en la fenomenología de la descompresión se ha detectado la presencia permanente de microburbujas en el cuerpo del buzo <sup>[17, 18, 19]</sup>, incluso cuando no existe una violación de los límites que establecen los algoritmos. El fenómeno que da origen a la formación de estas burbujas se conoce como cavitación, el cual consiste en la formación de la fase de vapor en un líquido cuando se reduce la presión formando pequeñas burbujas cuya presión interna es mayor que la presión del tejido circundante (como ocurre con las gotas de agua en las nubes). Estas microburbujas funcionan como núcleos de acreción para el gas disuelto en el líquido <sup>[19]</sup>. Estas microburbujas no suelen representar un peligro latente para el buzo si se mantienen de un tamaño lo suficientemente pequeño. Algunos computadores de buceo tienen algoritmos sofisticados que incorporan la mecánica de producción de estas microburbujas e incluyen paradas adicionales durante el ascenso para minimizar su producción y acreción <sup>[20, 21]</sup>.

## Bibliografía

1. Palmer, P. (2017). *The Atmosphere. A Very Short Introduction*. Oxford University Press.
2. Saha, K. (2010). *The Earth's atmosphere: Its physics and dynamics*. Springer.
3. Allan, R. P. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
4. Kondepudi, D., & Prigogine, I. (2014). *Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures*. John Wiley & Sons.
5. Blundell, S., & Blundell, K. M. (2010). *Concepts in thermal physics*. Oxford University Press.
6. Lautrup, B. (2011). *Physics of Continuous Matter, second edition: Exotic and everyday phenomena in the macroscopic world*. CRC Press.
7. Bosco, G., Rizzato, A., Moon, R. E., & Camporesi, E. M. (2018). Environmental physiology and diving medicine. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00072>
8. Mallen, J. R., & Roberts, D. S. (2019). SCUBA Medicine for otolaryngologists: Part I. Diving into SCUBA physiology and injury prevention. *The Laryngoscope*, 130(1), 52–58. <https://doi.org/10.1002/lary.27867>
9. Wienke, B. R. (1994). *Basic diving physics and applications*. Best Pub Co.
10. Shilling, C. (2012). *The Underwater Handbook: A Guide to Physiology and Performance for the Engineer*. Springer.
11. Michael Panneton, W. (2013). The mammalian spanning response: An enigmatic reflex to preserve life? *Physiology*, 28(5), 284–297. <https://doi.org/10.1152/physiol.00020.2013>
12. Godek, D., & Freeman, A. M. (2021, September 28). *Physiology, spanning reflex*.
13. NCBI Bookshelf. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538245>
14. Boycott, A. E., Damant, G. C. C., & Haldane, J. S. (1908). The prevention of compressed-air illness. *Journal of Hygiene*, 8(3), 342–443. <https://doi.org/10.1017/s0022172400003399>
15. Workman, R. Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium- oxygen spanes. Res Rep 6-65. *US Navy Experimental Diving Unit*.
16. Baker, E. C. (2016) *Understanding m-values*.
17. Bühlmann, A. A. (2013). *Decompression – decompression sickness*. Springer Science & Business Media.
18. Spencer, M. P. (1976). Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles. *Journal of Applied Physiology*, 40(2), 229–235. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.40.2.229>

19. Wienke, B. R. (2008). *Diving physics with bubble mechanics and decompression theory in depth*.
20. Wienke, B. R. (2016). *Biophysics and diving decompression phenomenology*. Bentham Science Publishers.
21. Wienke, B. R. (1990). Reduced gradient bubble model. *International Journal of Bio-Medical Computing*, 26(4), 237–256. [https://doi.org/10.1016/0020-7101\(90\)90048-y](https://doi.org/10.1016/0020-7101(90)90048-y)
22. Angelini, S. (2018). Dive computer decompression models and algorithms: Philosophical and practical views. *Underwater Technology*, 35(2), 51–61. <https://doi.org/10.3723/ut.35.051>



## Propuesta de protocolo de buceo seguro para actividades científicas

---

Edgardo Ochoa\*

Jorge Dario Gómez Cantillo\*\*

---

El buceo científico es una técnica productiva para la investigación y las observaciones subacuáticas. Es una herramienta de apoyo en la generación de datos, colecta de materiales y complemento en las observaciones y mediciones por científicos y buceadores capacitados<sup>1</sup>.

El buceo con fines de investigación y educativos se realiza en una gran variedad de ambientes, incluyendo arrecifes de coral y rocosos, manglares, bosques de algas, ambientes polares, aguas azules, estuarios, aguas termales, zonas hipersalinas, cuevas, cavernas, lagos, canteras y ríos. Las disciplinas que utilizan el buceo científico abarcan una amplia gama de ciencias, incluyendo las ciencias físicas, químicas, geológicas, biológicas, paleontológicas y arqueológicas<sup>2</sup>.

Los primeros esfuerzos de la comunidad de buceo científico para autorregularse se dieron en 1951 en los Estados Unidos, buscando promover actividades seguras mediante programas de entrenamiento y educación continua. Desde entonces, manuales de entrenamiento y estándares de seguridad en buceo han circulado entre distintas organizaciones. Los mismos han sido revisados y modificados para que reflejen los avances tecnológicos y técnicas. Así como los descubrimientos médicos en relación con el buceo, dando como resultado un avance significativo en las ciencias marinas. En la actualidad el documento *Standards for Scientific Diving Certifications and Operations of Scientific Diving Programs* de la AAUS (Academia Americana de Ciencias Subacuáticas, por sus siglas en inglés) representa los lineamientos

---

\* Conservation International, Arlington, VA, EEUU

\*\* Divers Alert Network, Durham, NC, EEUU, CostaMed, Cozumel, QR; México.

mínimos en los Estados Unidos para el desarrollo de actividades de buceo científico.

En América Latina y a pesar de que varios países (Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Chile, Ecuador, El Salvador, Honduras, México, Nicaragua, Panamá y Perú) cuentan con algún tipo de legislación, el buceo científico es mencionado brevemente y no existe una reglamentación específica para esta actividad.

La intención de este documento es ofrecer un marco general de actuación a nivel individual y como organización. El mismo tendrá que ser adaptado a las normativas locales y políticas internas de la organización auspiciante. Proponemos que este protocolo se pueda seguir ajustando a las posibilidades y capacidades de las organizaciones; a su personal para que puedan ir atendiendo de manera prioritaria los aspectos de seguridad y que eventualmente se convierta en la línea de partida para lograr un reconocimiento y protección jurídica para los participantes en el buceo científico. Adicionalmente, con el fin de preservar la riqueza del idioma castellano se ha creado esta tabla de sinónimos en lugar de unificar los términos.

<b>Apnea</b>	<b>Buceo a pulmón</b>	<b>Buceo libre</b>
Boya salchicha	Boya de seguridad	Boya scuba tuba
Botella	Cilindro	Tanque
Bote	Embarcación	Lancha
Buceador (a)	Buzo (a)	
Buceo	Inmersión	
Careta	Máscara	Visor
Cuadrante	Cuadrícula	
Pito	Silbato	

## PROTOCOLO DE BUCEO SEGURO

### Contenido

#### Secciones

1. Introducción
2. Buceo (*insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)
3. Responsabilidades del buceador líder
4. Seguridad y plan de emergencia
5. Registros personales
6. Profundidades máximas y paradas de descompresión

#### Anexos

1. Auspicios (*insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)
2. Recomendaciones de buceo seguro
3. Procedimientos de buceo
4. Plan de buceo
5. Bitácora de buceo
6. Historial médico de buceo
7. Registro personal

## SECCIONES

### 1. Introducción

- 1.1 (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) tiene responsabilidades legales sobre la salud y la seguridad de los miembros registrados (personal académico, estudiantes, empleados y voluntarios) que participan en actividades de buceo. Dicha responsabilidad legal no es abierta y depende de que todos los participantes que realicen buceo lo hagan de manera segura y responsable.
- 1.2 Estas reglas no pretenden ser restrictivas y están escritas en gran medida para el beneficio de todos los buceadores. Se espera que si los buceadores se sienten limitados por estas reglas discutan esto con el (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*) para que se puedan acordar excepciones en casos específicos y las reglas se actualicen cuando sea apropiado.
- 1.3 A medida que crezca la experiencia los protocolos de seguridad en el buceo continuarán evolucionando y cambiando en respuesta a las

necesidades del programa para seguir proporcionando al personal educación continua y poder considerarlos parte de nuestro equipo de seguridad.

- 1.4 El responsable de (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*) también proporciona información sobre “Buceo seguro” en su sitio web. Ver ANEXO II
2. **Inmersiones bajo el auspicio de** (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)
  - 2.1 ¿Qué es y no es una inmersión auspiciada? ¿Quién es responsable de garantizar un buceo seguro? Cualquier buceo que implique CUALQUIER recurso de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) es potencialmente un buceo auspiciado a menos que (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*) confirme lo contrario. Por ejemplo, incluidos, pero no limitados a:
    - Participación Oficial de cualquier miembro de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*).
    - Uso de cualquier equipo propiedad de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) (equipo de buceo, entrenamiento o equipo de seguridad).
    - Uso de los recursos financieros de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)(pago de servicios, alquiler, etc.).
    - Cualquier inmersión y/o viaje de buceo que haga uso de los recursos de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) pueden definirse mediante la descripción de los auspicios de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) que se proporcionan en el ANEXO I.
  - 2.2 Si la inmersión/viaje se realiza con la aprobación del (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*), entonces se espera que se cumplan todas las pautas de “Buceo seguro” de la (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) (ANEXO II). Esto incluye principalmente, la observación del plan de buceo (incluyendo límites de tiempo y profundidad, así como buceos repetitivos), plan de emergencia y la disponibilidad de un buceador líder para administrar y supervisar las inmersiones. Si la salida al campo o sitio de entrenamiento se aprueba y cumple con todos los requisitos

de seguridad de buceo de la (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*), entonces se considera una “Actividad de buceo auspiciada”.

- 2.3 Cualquier inmersión fuera de las prácticas de “Buceo seguro” de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) es completamente a riesgo del participante, o al menos, fuera del alcance de este documento.

Si tiene alguna duda sobre si la actividad se considera o no una “Actividad auspiciada”, esto debe aclararse con el (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*)

- 2.4 Cualquier miembro registrado como buceador puede planificar una inmersión. Hable con (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*), para que le asesore sobre la organización correspondiente.

- 2.5 Todas las inmersiones bajo los auspicios de la (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) deben acordarse con el (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*), que le pedirá la siguiente información:

- Buceador líder.
- Nombres, calificaciones y experiencia de todas las personas que van a bucear.
- Sitio de buceo.
- Tipo de buceo involucrado (orilla, bote, etc.) y las profundidades máximas planificadas.
- Plan de seguridad/emergencia.

### **3. Responsabilidades del buceador líder**

Es responsable de la conducción segura de las inmersiones. Las responsabilidades del buceador líder incluyen:

- Acordar los detalles de la inmersión con el (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*) antes de la salida.
- Asegurarse que la información de todos los buceadores, las certificaciones y el cuestionario médico estén actualizados. (ANEXO VI).

- Asignación de parejas y aprobación de planes de buceo.
  - Asegurar que el buceo cuente con un plan de seguridad/emergencia de superficie.
  - Mantener los registros completos de las inmersiones.
  - Coordinación de acciones en caso de algún incidente.
  - Asegurar que toda la inmersión se realice dentro de las prácticas de buceo seguro.
- 3.1 El Buceador líder debe estar calificado como buzo avanzado/buzo de rescate o superior, a menos que se acuerde lo contrario con el (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*).
- 3.2 El Buceador líder debe designar a un suplente que asumirá sus responsabilidades si está ausente.
- 3.3 El buceador líder debe evaluar los riesgos presentes en el sitio de buceo y administrar las actividades de buceo para minimizar el riesgo para todos los miembros del equipo. Cuando sea necesario, se debe buscar asesoramiento de fuentes locales (por ejemplo: buceadores, tiendas de buceo, capitán de puerto, pescadores, etc.). Se deben considerar varios factores:
- Condiciones climáticas y estado del mar.
  - Condiciones de marea durante y después de las inmersiones.
  - Condiciones de buceo adversas: visibilidad, profundidad, temperatura del agua.
  - Puntos de entrada y salida.
  - Calificaciones y nivel de habilidad de buzos
- 3.4 El buceador líder debe estar familiarizado con las calificaciones de buceo y la experiencia de los miembros del grupo y normalmente asignará parejas para que los buceadores menos experimentados buceen con los más experimentados. En cualquier sitio de buceo, el procedimiento más seguro es que una persona de la pareja haya buceado previamente en el sitio.
- 3.5 El Buceador líder debe asegurarse de que el oxígeno de emergencia esté disponible en el sitio de buceo. Un administrador de oxígeno debidamente calificado deberá estar presente en el viaje.

- 3.6 El Buceador líder puede optar por suspender las actividades de buceo si considera que las condiciones presentan un nivel de riesgo inaceptable, dadas las calificaciones y la experiencia del grupo.
- 3.7 El Buceador líder tiene el derecho y la responsabilidad de suspender la inmersión de cualquier miembro del grupo cuya conducta se considere imprudente o peligrosa.

#### **4. Plan de seguridad / emergencia**

- 4.1 Todas las inmersiones tendrán un plan de seguridad. En la mayoría de los casos, es aceptable que un NO buceador actúe como persona de seguridad. Si no se cuenta con apoyo en superficie, el plan de seguridad generalmente se adecuará de alguna de dos maneras:
  - 4.1.1 Si hay más de una pareja de buceadores, un par proporcionará cobertura mientras que la otra se sumerge.
  - 4.1.2 Si solo está involucrado un par de buceadores, una tercera persona debe estar alerta en superficie.
- 4.2 Para las inmersiones desde una embarcación, habrá alguien responsable y competente para brindar asistencia a los buzos en problemas y para solicitar asistencia. En tierra se debe dejar información sobre el destino, hora estimada de retorno y qué medidas tomar si esto no se cumple.
- 4.3 En todos los casos, el personal en superficie debe estar debidamente informado y debe ser capaz de llevar a cabo procedimientos de emergencia.

#### **5. Registros personales**

- 5.1 Registro de calificación (ANEXO VII) en (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*): todos los buceadores deben tener certificaciones actualizadas en su registro. Se debe proporcionar evidencia de su certificación para todos los buceos bajo los auspicios de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*).
- 5.2 Bitácora de registro de buceo: los buceadores deben mantener una bitácora de sus inmersiones. Este es un documento de referencia, que muestra los diferentes aspectos y la información pertinente de las inmersiones pasadas. (Anexo III)
  - 5.2.1 La información que necesita incluir (pero no limitada) es:

- Fecha y lugar.
- Nombre de compañero.
- Equipo usado
- Información de profundidad, tiempo, descompresión y parada de seguridad.
- Tipo de inmersión (barco, costa, noche, agua dulce, baja visibilidad, etc.).
- Una descripción de la inmersión.

## **6. Profundidades máximas y paradas de descompresión**

- 6.1 Se llama la atención de todos los buceadores sobre los límites establecidos en su certificación y su relación con las profundidades máximas autorizadas por (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*). Los Buceadores están restringidos a los límites especificados. Es decir, en ninguna circunstancia que no sea de emergencia, ningún buceador excederá la profundidad máxima autorizada.

## ANEXOS

### ANEXO I

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) 2023

Auspicios (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

#### **Propósito**

El propósito de este documento es asegurar que todas las actividades relacionadas con buceo sean llevadas a cabo de forma que se brinde protección a los buceadores en caso de accidentes o fallas, además de establecer los lineamientos de autorización para mejorar los procesos de logística y de seguridad. La (*insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) podrá adoptar estándares adicionales de acuerdo con los procedimientos locales de operación.

El presente protocolo fue desarrollado y escrito acorde a las políticas y programas de buceo de varias universidades y centros de investigación.

#### **Ámbito**

Este manual cubre aquellas actividades de buceo con fines de investigación científica o propósitos educativos que sean llevadas a cabo mediante el uso de tubo respirador, aire comprimido o aire enriquecido (nitrox). Este manual no aplica para:

- Buceo recreativo.
- Buceo por debajo de los 30 metros.
- Buceo comercial.
- Buceo suministrado desde la superficie.
- Inmersiones de saturación, mezcla de gases, campanas de buceo y vehículos sumergibles.

## ANEXO II

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)2023

Buceo seguro (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

Como cualquier actividad física el buceo requiere un conocimiento y entrenamiento previo a su práctica.

Un requisito para bucear con seguridad es realizar un curso de capacitación con instructores certificados. Usualmente estos cursos incluyen un reconocimiento médico.

Se recomienda antes de bucear haber seguido un entrenamiento físico que ayudará a reducir el riesgo de sufrir calambres por fatiga muscular y fortalecer músculos. Las actividades aeróbicas como correr, caminar, nadar o bicicleta ayudan a mejorar la capacidad pulmonar y aeróbica, entrenar en piscina o aguas confinadas para depurar la técnica de nado con aletas.

Algunos países cuentan con leyes y normas específicas para las actividades de buceo. En caso de existir, cualquier actividad de buceo debe estar alineada con dichas normativas.

Buceo en parejas: nunca se debe realizar alguna actividad de buceo de forma individual, siempre al menos, junto a otro buceador. La comunicación entre compañeros de buceo es primordial para confirmar que la actividad va bien o para advertir de algún problema físico, ambiental o con el equipo.

Mantenimiento del equipo: se debe contar con equipo completo y en óptimo estado. Es lo mínimo para realizar un buceo seguro. Antes de bucear, comprobar que todas las piezas son funcionales:

- Traje de neopreno: talla adecuada. Su grosor debe adecuarse a la temperatura del agua.
- Visor: o máscara de buceo que se ajuste bien al rostro.
- Aletas de buceo: varían en función del uso y forma física del buceador. Consulte a su instructor sobre las mejores opciones.
- Compensador de flotabilidad: permite al buceador lograr una flotabilidad neutra bajo el agua, y proporciona asistencia en los ascensos y descensos.
- Sistema de lastre: sirve para restar flotabilidad al equipo de buceo, hay que elegirlos en función de la flotabilidad del equipo y la del buceador. Algunos compensadores de flotabilidad tienen sistemas de peso integrados, otros son por medio de un cinturón.

- Tanques de buceo: asegurarse que el gas respirable sea el adecuado y que las fechas hidrostáticas y de inspección visual del tanque estén vigentes.
- Regulador: permite salir el aire de la botella de buceo de una manera controlada. En caso de que el regulador falle, la salida de aire aumentará. Podrá respirar, pero se debe procurar ascender a la superficie lo más pronto y seguro posible.
- Reloj de buceo: analógicos o digitales, para monitorear el tiempo durante la inmersión. Los relojes analógicos tienen un bisel para alinearlos con el minutero. Los digitales, tienen una función de cronómetro.
- Computadoras de buceo: un microprocesador basado en un dispositivo que calcula el proceso teórico de descompresión en tiempo real, por el uso de presión (profundidad) y tiempo como indicador de un modelo de descompresión, o juego de tablas de descompresión, programado dentro del dispositivo.

Tener información sobre los sitios de buceo:

- Condiciones del mar.
- Comunicaciones (cobertura de radio y teléfono celular).
- Instalaciones médicas más cercanas

Preparar cuerpo y mente justo antes de bucear. Para aumentar la agilidad y la destreza en los movimientos. Realizar una serie de estiramientos.

Además de físicamente, la preparación mental es importante. Una de las condiciones más importantes para bucear seguro es saber mantener la calma. Si durante una inmersión se presenta algún problema, el miedo y la inseguridad pueden convertir un incidente menor en un accidente lamentable. Una maniobra descontrolada podría perjudicar seriamente la integridad y salud.

Estar correctamente hidratado, comer un par de horas antes dando tiempo a la digestión, evitar los alimentos que provoquen acidez o mala digestión.

No haber descansado lo suficiente, haber bebido alcohol o una comida abundante pueden provocar cansancio y disminuir la capacidad de reacción ante un problema.

Recuperación después del buceo: descanso e hidratación. Alimentación para reponerse del desgaste físico. Los frutos secos aportarán energía y el plátano o banana ayudará a recuperar el desgaste muscular.

Visita a un médico si hay malestar después de la inmersión: si después de bucear hay malestar, mareos, hormigueo, manchas rojizas en la piel, dolores de cabeza, musculares, de las articulaciones, estómago u oídos, o sangrado por la nariz, acuda al médico. Los síntomas de la enfermedad por descompresión o las lesiones de oído pueden aparecer minutos después de la inmersión o después de algunas horas.

Evite volar hasta 24 horas tras bucear:

- Después de buceos no descompresivos, los buceadores no podrán volar hasta cumplir un intervalo de superficie mínimo de 12 horas.
- Para múltiples buceos por día o múltiples días de buceo, los buceadores deberán cumplir un intervalo de superficie mínimo de 18 horas antes de volar.
- Para los buceadores que realizan inmersiones que requieran paradas de descompresión, deberán cumplir un intervalo de superficie mínimo de 24 horas antes de volar.
- Para viajes por tierra que requieran ascender a alturas mayores a 300 metros o 1000 pies, se deberán seguir los procedimientos de intervalo de superficie de pre-vuelo, a menos que se utilicen procedimientos descompresivos que den cuenta del incremento de la elevación.

### ANEXO III

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) 2023

Procedimientos de buceo

Procedimientos previos a la inmersión

(*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

Las inmersiones deberán ser planeadas de acuerdo con el nivel de entrenamiento del buceador menos experimentado. Antes de conducir cualquier operación de buceo bajo los auspicios de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*), el supervisor debe elaborar el plan a seguir y éste debe contar con lo siguiente:

- Calificaciones de los buceadores y tipo de certificación de cada uno.
- Plan de emergencia con la siguiente información:
  - Nombre y teléfono de la persona a contactar en caso de emergencia.
  - Cámara hiperbárica más cercana.
  - Hospital accesible más cercano.
  - Medios de transporte disponibles.
- Número aproximado de inmersiones propuestas.
- Sitio(s) de inmersión propuesto.
- Estimación anticipada de profundidad y tiempo de fondo.
- Si se requiere, plan de descompresión y buceo repetitivo.
- Trabajo propuesto, equipo y embarcaciones o vehículos a utilizar.
- Condiciones desfavorables anticipadas.

#### **Revisión de seguridad previa a la inmersión**

- Responsabilidad del buceador:
  - Cada buceador debe revisar el buen funcionamiento de su propio equipo en presencia de un compañero.
  - Es deber y responsabilidad de cada buceador negarse a bucear si a su juicio las condiciones no son favorables, o se están violando los preceptos de su entrenamiento o del Protocolo de buceo de (*insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*).
  - Ningún miembro del equipo debe bucear en cualquier condición que ponga en riesgo su seguridad o la de algún otro miembro del equipo.

- Evaluación del Equipo.
  - Cada miembro del grupo debe asegurarse que su equipo trabaja adecuadamente y que este responde a las necesidades de la operación a realizar.
  - Cada miembro del equipo debe tener la capacidad para lograr y mantener flotabilidad positiva.
- Evaluación del lugar.
  - Evaluar las condiciones ambientales y del sitio.

**ANEXO IV**

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)2023

Plan de buceo (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

FECHA: \_\_\_\_\_

RESPONSABLE: \_\_\_\_\_

FECHA DE LA INMERSIÓN: \_\_\_\_\_

SITIO DE LA INMERSIÓN: \_\_\_\_\_

JEFE DE DEPARTAMENTO: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Buceadores participantes

Nombre	Profundidad autorizada	Certificación	Correo electrónico

Información de Emergencia:

Nombre del buceador	Teléfono de emergencia	Nombre del contacto	Relación

Plan de Emergencia:

Cámara hiperbárica más cercana: \_\_\_\_\_

Instalación médica más cercana: \_\_\_\_\_

Método de Transporte: \_\_\_\_\_

Local: 123456.

Marino: 123456.

DAN: (919) 684-8111

0. Número aproximado de inmersiones: \_\_\_\_\_

0. Profundidades y tiempos previstos: \_\_\_\_\_

0. Buceo repetitivo: si/no \_\_\_\_\_

0. Tareas propuestas, equipo y transporte a utilizar: \_\_\_\_\_

0. Condiciones de peligro anticipadas: \_\_\_\_\_

Aprobación: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

**ANEXO V**

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)2023

Bitácora de buceo (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

El Protocolo de Buceo de (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*), requiere que todos los buceadores bajo su auspicio completen esta forma con la información de las inmersiones realizadas en cada actividad y la misma sea enviada a (*inserte el nombre de la persona responsable administrativo o a quien se designe para dicha tarea*).

**Buceador** \_\_\_\_\_ **Unidad** \_\_\_\_\_

#	Fecha	Acompañante	Localidad	Max. Prof.	Tiempo de fondo	Intervalo de superficie	Comentarios
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Total inmersiones:	Total de tiempo en minutos:	Computadoras de buceo o Tablas utilizadas:
--------------------	-----------------------------	--

## ANEXO VI

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*) 2023

Historial médico para buceo (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)

Nombre: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_

Peso: \_\_\_\_\_ Altura: \_\_\_\_\_ Institución: \_\_\_\_\_

Departamento: \_\_\_\_\_

Motivo:

Entrenamiento

Proyecto o materia

El buceo SCUBA representa considerables demandas físicas y mentales al organismo. Bucear con ciertas afecciones médicas pueden representar algún riesgo no solo a su persona, sino para quienes estén en contacto directo con usted, ya sea en la superficie o bajo el agua. Por tal motivo es prudente que cumpla los requisitos médicos y físicos necesarios antes de iniciar su programa de entrenamiento como buceador o para participar de las diversas actividades subacuáticas llevadas a cabo por (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*).

Sus respuestas son muy importantes para determinar su condición y estado físico. Obviamente se le solicita ofrecer información lo más precisa y verídica posible, de lo contrario la evaluación médica no tendrá sentido.

Esta forma se mantendrá confidencial. Si usted considera que algunas de las preguntas representan invasión a su privacidad puede omitir su respuesta, pero tendrá que comentarlas posteriormente con el médico responsable de su evaluación, quien indicará por escrito que no existen evidencias de enfermedad que puedan afectar su salud al practicar buceo.

	<b>Ha padecido o padece algunas de las siguientes enfermedades o condiciones</b>	<b>Sí</b>	<b>No</b>	<b>Comentarios</b>
1	Problemas con los oídos, incluyendo ruptura de tímpano, cirugía o dificultad para equalizar			
2	Vértigos			
3	Cirugía ocular			
4	Depresión, ansiedad, claustrofobia o agorafobia			
5	Abuso de sustancias, incluyendo alcohol			

6	Pérdida de conciencia			
7	Epilepsia o convulsiones			
8	Déficit neurológico			
9	Desórdenes neurológicos recurrentes o ataques isquémicos			
10	Aneurismas o hemorragia cerebral			
11	Embolismo o enfermedad descompresiva			
12	Lesiones craneoencefálicas			
13	Desórdenes sanguíneos o fragilidad capilar			
14	Enfermedades al corazón			
15	Anormalidades cardiacas foramen oval			
16	Arritmia cardiaca o necesidad de un marcapaso			
17	Dificultad para realizar ejercicio			
18	Hipertensión			
19	Colapso u otra enfermedad pulmonar			
20	Asma			
21	Diabetes mellitus			
22	Embarazo			
23	Intervenciones quirúrgicas			
24	Hospitalizaciones			
25	Medicamentos prescritos			
26	Alergias			
27	Colesterol alto			
28	Antecedentes familiares de asma o diabetes			
29	Otras enfermedades			

Por favor explique cualquier respuesta a las anteriores preguntas que haya contestado "SÍ".

---



---



---

Nombre: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

## ANEXO VII

BUCEO (*Insertar el nombre de su organización, dependencia o institución*)2023

FECHA \_\_\_\_\_

### Registro del Buceador

Nombre: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Teléfono: Casa: \_\_\_\_\_ Trabajo: \_\_\_\_\_ Móvil: \_\_\_\_\_

Correo electrónico: \_\_\_\_\_

Fecha de nacimiento: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_

### Información de emergencia

Nombre: \_\_\_\_\_ Relación: \_\_\_\_\_

Teléfono: Casa: \_\_\_\_\_ Trabajo: \_\_\_\_\_ Móvil: \_\_\_\_\_

Certificaciones de buceo: \_\_\_\_\_

Certificaciones especializadas: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### Anexar copias

#### Certificaciones de cuidado de emergencia:

RCP: \_\_\_\_\_

Administración de oxígeno: \_\_\_\_\_

Primeros auxilios: \_\_\_\_\_

#### Actividad de buceo

Número total de inmersiones: \_\_\_\_\_ Número total de horas: \_\_\_\_\_

Máxima profundidad: \_\_\_\_\_ Fecha de última inmersión: \_\_\_\_\_

## **Bibliografía**

1. Heine, J. N. *Scientific diving techniques: a practical guide for the research diver*. (2011).
2. Ochoa, E. & A. Hernández-Velasco. *Buceo científico ¿Qué es? Y el estado actual en México*. Espacio Profundo edición 178. (2021).



## Guía de operaciones en primeros auxilios y plan de emergencia en buceo científico

---

Luis Fernando Barrios H.\*

---

### Introducción

El buceo científico es una práctica de apoyo a la investigación, que se realiza en diferentes ambientes, asociados a condiciones ambientales que pueden presentar riesgos, generalmente por una mala gestión del equipo. Por tal motivo se considera que la prevención de accidentes y la adecuada gestión de las emergencias debe ser una prioridad en las expediciones científicas.

Este documento propone estándares mínimos de actuación como primer respondiente y la gestión adecuada de las emergencias en buceo científico, teniendo en cuenta que hay regulaciones en la gestión del riesgo en los diferentes países y trabajos relacionados con el buceo científico que se deben adicionar a esta propuesta según el país.

### 1. Primeros auxilios

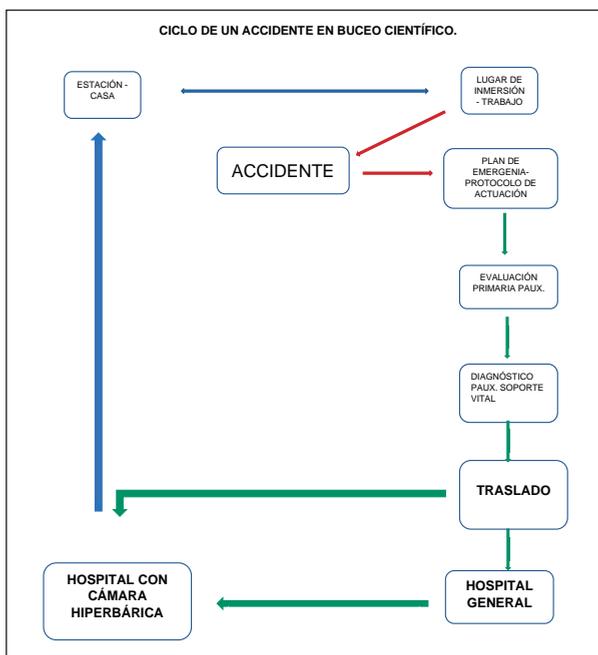
Este apartado se enfoca en los protocolos de actuación que se realizan con un buzo científico accidentado en el lugar de la inmersión, ya que la acción oportuna y eficaz es de vital importancia para llegar a un traslado adecuado. (ver gráfico).

### 2. Recomendaciones generales

**Mapa hospitalario por especialidad:** elaborar un listado de centros de atención de emergencias de la zona de operaciones. Realizar una valoración de

---

\* Instructor confirmado de buceo científico M3 CMAS, Federación Colombiana de Actividades Subacuáticas.



riesgos adecuada basados en protocolos como las NTC 45 (Norma Técnica 45, Guía técnica para la identificación de peligros y valoración de riesgos en SSt, OSHAS). Contar con más de una persona entrenada, capacitada y certificada como primer respondiente en primeros auxilios en el equipo de trabajo. Por último, evaluar medios de transporte, distancias y tiempo de respuesta para un traslado en caso de accidente de buceo en la operación científica.

Se debe contar con capacitación en evaluación de accidentados en buceo, estar seguros del diagnóstico de una enfermedad de buceo y que todo el equipo conozca el plan de emergencia.

**En las hemorragias externas:** se debe proceder con protocolos recomendados internacionales, como “stop the bleed”.

En hemorragias externas que comprometan la vida del buzo científico se recomienda utilizar el siguiente protocolo.

**A:** alertar. Siguiendo el plan de emergencias se debe dar alerta a los organismos y/o centros de atención de emergencias de la zona.

**B:** reconocimiento de la hemorragia. Encuentre la fuente de la hemorragia: acumulamiento de sangre en el traje del buzo, diferentes puntos de sangrado, ya sea en los brazos, las piernas y el cuerpo.

C: actúe para el control de la hemorragia dependiendo el sitio del accidente y la duración de la respuesta de emergencia de la siguiente forma:

1. **Presión directa.** Ubique la fuente del sangrado y aplique presión directa con un vendaje compresivo con suficientes gasas o una tela. No deje de hacer presión hasta detener el sangrado y que llegue la ayuda.
2. **Empaquetar.** Si la hemorragia proviene de una herida profunda debe hacer el procedimiento de empaquetar una gasa en la herida y realizar presión directa hasta detener el sangrado mientras llega la ayuda.
3. **Uso del torniquete.** Se debe considerar el uso del torniquete en las extremidades con heridas en las que la hemorragia no se detiene con los dos pasos anteriores:
  - Aplique el torniquete de 2 a 3 pulgadas arriba de la herida.
  - No lo coloque sobre las articulaciones.
  - Gire y ajuste el torniquete hasta que el sangrado se detenga por completo.
  - NO remueva el torniquete.

**En fracturas:** tras reconocer la fractura, ya sea interna o con exposición del hueso, no mover innecesariamente a la persona. Active su plan de emergencia y tome medidas mientras llega la ayuda médica.

**Signos:**

1. Articulación o extremidad deformada
2. Inflamación con hematomas y en algunas hemorragia y exposición del hueso
3. Dolor intenso
4. Hormigueo y entumecimiento
5. Imposibilidad de movimiento y dolor
  - **Detener la hemorragia.** Ponga en práctica el protocolo de manejo de hemorragias.
  - **Inmovilizar la zona afectada.** Se debe utilizar las férulas de inmovilización para fijar el miembro afectado. NO trate de alinearlo ni acomodarlo. Si la fractura se puede determinar en la mitad del hueso inmovilizar las articulaciones en ambos lados del hueso. Si por el contrario la articulación es afectada, inmovilizar los huesos en ambos lados de la articulación. En caso de fractura abierta o expuesta inmovilizar y cubrir la herida con gasas.

- **Con inflamación.** Trate de reducir el dolor y la inflamación con compresas de hielo. NO colocar el hielo directamente sobre la piel. Siempre envuelva el hielo en algún material para aplicarlo sobre la piel.

**En quemaduras:** las quemaduras tienen varias fuentes para ser producidas, como la radiación, el contacto directo o indirecto con fuentes de calor, corrientes eléctricas o agentes químicos. Las quemaduras provocan la muerte celular y pueden ser muy peligrosas y ocasionar la muerte.

#### **Consideraciones:**

1. **De primer grado:** las quemaduras que afectan la epidermis pueden causar dolor e inflamación.
2. **De segundo grado:** quemaduras que afectan la primera capa de la piel y la subyacente causan dolor, enrojecimiento, hinchazón y ampollas.
3. **De tercer grado:** quemaduras que afectan todas las capas de la piel y hasta la parte muscular y el hueso dependiendo de su gravedad. Presentan piel blanquecina y quemada.
  - Si es una quemadura menor, sin ruptura de la piel: deje correr agua fría o sumerja la parte afectada durante al menos 30 minutos, o aplique un paño húmedo. Proteja la parte afectada a los rozamientos y aplique una loción humectante con aloe.
  - Si la quemadura es grave, active su plan de emergencias, rocíe agua fría abundante, si está en llamas la persona trate de ahogar las llamas con un paño grande húmedo o haga que se tire al piso y ruede. NO quite ropas quemadas, NO reventar las ampollas; cubra la persona o la zona afectada con una tela limpia húmeda, NO aplicar ningún tipo de ungüento, si hay quemaduras en las articulaciones, manos y pies, trate de separarlos con una tela limpia húmeda.

**En alteraciones de la conciencia** cuando los estados de vigilia o de alerta se alteran, puede ser leve en un estado de confusión o grave en un estado de pérdida de conocimiento. Pueden estar ocasionados por traumatismos en la cabeza, falta de un buen aporte de oxígeno, drogas o alcohol.

#### **Síntomas:**

1. Amnesia
2. Dolor de cabeza

3. Mareo
4. Incapacidad de moverse o hablar
5. Latidos cardíacos lentos o rápidos
  - Active su plan de emergencia
  - Pregúntele nombre, fecha y edad
  - Revise vías aéreas y pulso
  - Si es necesario inicie la maniobra de RCP
  - Si sospecha de lesión de columna no lo mueva innecesariamente
  - Mantenga a la persona caliente
  - Si lo requiere administre oxígeno de emergencia para accidentes de buceo 15l/m
  - Controlar signos vitales

**Accidentes de buceo:** los accidentes o enfermedades de buceo se pueden clasificar de diferentes formas según el proceso de ocurrencia. Esta metodología propuesta se clasifica de la siguiente manera:

Clasificación		Mecanismo	Enfermedad o accidente buceo científico
Superficie			Traumatismos, heridas contusas. Pueden ocurrir por golpes por el oleaje, heridas por motonaves e hipotermia.
En descenso (compresión)	Mecánico	Efectos de la presión sobre los espacios aéreos del cuerpo	Barotrauma oído: trauma del oído interno, ruptura del tímpano. Senos paranasales: squeeze. Pulmonar: barotrauma pulmonar.
	Fisiopatológico	Aumento de la presión parcial	Intoxicación por oxígeno. Intoxicación por monóxido de carbono. Intoxicación por nitrógeno.
		Aumento de la solubilidad	Narcosis. Sobresaturación de tejidos.
En ascenso (descompresión)	Mecánicos	Expansión del aire	Disbarismo en oído. Perforación del tímpano . Barotrauma
			Ruptura pulmonar (enfisema mediastinal, neumotórax, embolismo gaseoso arterial)
	Fisiopatológicos	Sobresaturación de tejidos	Enfermedad por descompresión. Cutánea - osteomuscular neurológica.

Las enfermedades o accidentes de buceo pueden ser fatales o no fatales y en este documento se pretende dar recomendaciones de actuación en este tipo de accidentes.

**Barotraumas:** son daños a tejidos del cuerpo, debido a los cambios en la presión en los espacios aéreos.

**De oído:** se debe al cambio de presión, tanto en la inmersión como en el ascenso, en la parte interna o externa del tímpano que puede incluir daño o ruptura. El daño se pueden agravar con maniobras de compensación inadecuadas o forzadas.

**Signos:**

1. Mareo
2. Dolor en la parte afectada
3. Pérdida de la audición
4. Sensación de presión en el oído
5. Hemorragia

**Primer auxilio**

1. Para disminuir el dolor sirve masticar chicle
2. Posición de cubito dorsal
3. Puede usar analgésicos
4. Trasladar a un centro médico según complicaciones

**De pulmón:** ocurre durante el ascenso y es causado por el aumento de la presión intrapulmonar debido a retener la respiración o realizar ascensos rápidos sobrepasando la velocidad de ascenso 9/mxm. Puede causar distensión del tejido, embolismo gaseoso y paso del gas a los tejidos adyacentes.

**Signos y síntomas:**

1. Puede aparecer antes del ascenso o a los 10 minutos después de la inmersión
2. Aumento de la frecuencia respiratoria, tos, dolor del tórax
3. Neumotórax, enfisema mediastino
4. Pérdida de la conciencia
5. Signos neurológicos

**Primer auxilio:**

1. Active su plan de emergencia
2. Administración de oxígeno de emergencia al 100% 15ls/min

3. Traslade a un centro médico con cámara hiperbárica

**De descompresión inadecuada:** respuesta del cuerpo a una baja de presión causando la formación de burbujas en los tejidos.

**Causas:**

1. Velocidad de ascenso descontrolada
2. Presencia de drogas o alcohol
3. Deshidratación
4. Saltarse una parada de seguridad obligatoria

**Signos y síntoma:**

**Tipo 1**

- Piel de naranja, prurito, dolor
- Pecas púrpuras o piel marmórea

**Tipo 2**

- Bends
- Dolor intenso en las articulaciones que no pasa con descanso

**Tipo neurológico**

- Pérdida de fuerza en extremidades
- Retención de líquidos
- Fatiga extrema
- Alteración del habla, la visión o la audición
- Compromiso de la conciencia

**Tipo cardiopulmonar**

- Dolor en tórax
- Tos con sangre
- Cianosis y sensación de frío

**Procedimiento a general a seguir**

1. Active su plan de emergencia y rescate
2. Recupere del agua al buzo según técnicas de rescate
3. Valore y actúe con protocolo de primer auxilio
4. Pida ayuda. Active plan
5. Traslade al buzo de cubito dorsal izquierdo

6. Controle signos vitales
7. Administre oxígeno de emergencia al 100 % 15 lts/min
8. Si es el caso suministre protocolo de RCP
9. Reduzca la hipotermia
10. Control neurológico por personal entrenado

### **3. Plan de emergencia**

A través de un proceso de planificación se logra la organización adecuada para actuar de forma óptima en caso de una emergencia en buceo científico durante una expedición. Aunque también depende de si en el país donde se practique el buceo científico ya existen regulaciones que obligan a tener un plan de emergencia entrenado y enseñado para el control de emergencias.

El plan de emergencia facilita el actuar rápido de los rescatistas, garantiza minimizar pérdidas vitales y económicas y debe cumplir con los siguientes objetivos:

1. Conocer el sitio donde se realiza la expedición.
2. Tener una evaluación de riesgos adecuada para estar preparado a la emergencia.
3. Contar dentro del equipo con personal capacitado, certificado y entrenado para el control de emergencias.
4. El plan de emergencias debe ser del dominio de todo el grupo participante en la expedición.

El plan de emergencia se compone de una serie de alertas:

- a. Alerta temprana: los encargados del traslado del buzo en emergencia a los sitios de atención médica.
- b. Médicos o asistenciales: aquí se enmarcan los centros medico de primera respuesta o especializados donde se hará llegar al buzo accidentado.
- c. Traslado de accidentados: son los medios de traslado autorizados y especializados que tienen los componentes necesarios para asistir una emergencia de buceo mientras se llega al centro médico.
- d. Todo el personal debería estar en capacidad de prestar atención adecuada al buzo accidentado y activar el plan de emergencia.

El plan de emergencia cuenta con el aparte de autoprotección en la cual se relacionan los documentos necesarios para que el plan cumpla su objetivo.

**Evaluación del riesgo.** Aquí se debe consignar la valoración de los peligros marino, terrestres y de operación con sus respectivos controles o medios de minimizar los riesgos.

**Medios de autoprotección.** Todos los recursos tanto humanos y materiales disponibles para el control de riesgos en caso de emergencia.

**Plan de emergencia.** Contempla todos los posibles riesgos y los protocolos de actuación, además, de contar con un listado de contactos de los hospitales, medios de traslado y activación de seguros en caso de emergencia.

**Evaluación de riesgos.** Este documento contara con información importante del sitio y los riesgos expuestos en la expedición:

- Planos y direcciones del lugar de la expedición.
- Evaluación del nivel de riesgo al que se enfrentan los buzos en el lugar de expedición.
- Análisis y medidas de control de los riesgos.

RIESGOS DEL BUCEO EN BUCEO CIENTÍFICO			
Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Inmersiones sucesivas. Espeleobuceo. Buceo en cuevas. Buceo en pecios. Buceo bajo hielo. Buceo profundo (más de 40 m). Apnea profunda	Buceo en aguas confinadas o cerradas (lagos, pantanos). Buceo en lugares aislados (falta de infraestructuras, cámara hiperbárica, centros sanitarios). Buceo en apnea. Buceo nocturno. Buceo en corrientes.	Inmersiones a más de 20 m y menos de 40 m. Tiempos de buceo controlados.	Buceo a menos de 20 m con tiempos de buceo cortos. Buceos no repetitivos. Sitios de buceo con infraestructura adecuada para atender una emergencia.
EVALUACIÓN			
ADECUADAS		INADECUADAS	

## ANEXOS

### MEDIOS DE AUTOPROTECCIÓN

Medios materiales y técnicos	SÍ	NO	Ubicación	
Emisora VHF				
Teléfono				
Botiquín				
Equipo oxígeno al 100%				
Ambulancia				
Embarcaciones				
Helicóptero				
Cámara hiperbárica				
Medios humanos y sanitarios			SI	NO
Jefe de equipo				
Médico				
DUE/ATS				
Socorrista				
Hospitales				
Centro de Salud				
Hospitales				
Cruz Roja				
Protección Civil				

### PLAN DE EMERGENCIA

En el plan de emergencia está el paso a paso en la actuación en caso de emergencia, debe responder a preguntas como:

- **¿Qué se hará?** Dependiendo de la emergencia hasta finalizar con el traslado.
- **¿Cuándo se hará?** En el momento que la emergencia ocurra, de la forma más ágil y segura y aplicando los protocolos de primera ayuda si se requieren.
- **¿Cómo y dónde se hará?** Siguiendo los protocolos de actuación según evaluación de riesgos y tipo de emergencia. En el sitio de la emergencia hasta el traslado del buzo accidentado.
- **¿Quién lo hará?** El personal encargado de acuerdo con su papel en la emergencia y en la expedición.

## Anexo

### PLAN DE EMERGENCIA

UNIVERSIDAD O GRUPO DE INVESTIGACIÓN		
Dirección:	Teléfono:	
Fecha:	Hora:	Nº de investigadores:
Accesos de carreteras a la actividad de buceo:		
Jefe de equipo:	Teléfono:	
Guía de grupo:	Teléfono:	
Guía de grupo:	Teléfono:	
Guía de grupo:	Teléfono:	
Medios materiales		
Teléfono / Emisora VHF		
Tipo embarcación		
Equipamiento de la embarcación	GPS <input type="checkbox"/> Emisora VHF <input type="checkbox"/> Baliza EPIRB <input type="checkbox"/> Bote Auxiliar <input type="checkbox"/>	
Medios sanitarios humanos		
Médico		
DUE/ATS		
Socorrista		
Botiquín		
Equipo oxígeno al 100%		
Hospital más cercano		
Cámara Hiperbárica operativa más próxima		
Riesgo de buceo		
Muy Alto <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Bajo <input type="checkbox"/>		
Condiciones de evacuación		
Adecuadas		Inadecuadas
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>

## ANEXOS DE ACTUACIÓN

**Oxigenoterapia normobárica.** Es la administración de O<sub>2</sub> 100% por las vías respiratorias superiores a presión atmosférica ambiental.

- Aumenta la concentración de oxígeno inspirado.
- Previene y trata hipoxemia local y general.
- Mejora la oxigenación de los tejidos.
- Aumenta la velocidad de salida del nitrógeno y monóxido de carbono de los tejidos.
- Mejora el estado de shock.

**Valoración del estado del buzo.** Respira o no respira, cianosis, palidez, disnea, conciencia, grado de hipotermia, dolor, alteración de los movimientos y/o sensibilidad, etc.

### Objetivos:

- Apoyo respiratorio de manera segura y terapéutica.
- Fluidificación de secreciones en atmósfera húmeda.
- Prevenir complicaciones.
- Contribuir al tratamiento y evolución del buzo.

### Equipo:

- Fuente de O<sub>2</sub> fija y/o portátil.
- Flujómetro que permite entregar hasta 15 litros de O<sub>2</sub> por minuto.
- Mascarilla de reinhalación desechable, mantener más de una (al menos 2).

### Procedimiento:

- Buzo en decúbito dorsal (acostado).
- Tranquilizar al buzo.
- Conectar el regulador con alargador de la mascarilla al tubo de O<sub>2</sub>.
- Colocar la mascarilla al buzo bien adaptado a la cara, controlar su correcta postura en forma permanente.
- Abrir paso al O<sub>2</sub> al 100% 15 litros por minuto.

## **Bibliografía**

Verjano-Díaz, Francisco. *El hombre subacuático*. Díaz de Santos, 2000.

Aguirre, Fernando. *Manual de rescate y salvamento*. FEDAS 2009.

Felmer, Antonio. *Patologías del buceo. Guía clínica y de primeros auxilios*. Publicaciones ACHS, 2004.

## Nuevas perspectivas y moduladores inflamatorios de la enfermedad por descompresión

---

E. Cuauhtémoc Sánchez Rodríguez \*

---

### RESUMEN

La enfermedad por descompresión (ED) es una lesión compleja que involucra muchas cascadas inflamatorias. En los casos graves desencadena una respuesta inflamatoria sistémica similar a la del gran quemado, el trauma severo y el COVID-19. La obstrucción mecánica de los vasos sanguíneos o la formación de burbujas tisulares autóctonas, no logran explicar la gran variedad de signos, síntomas y daño que ocasiona las enfermedades por descompresión (ED). Todas las lesiones agudas (< 72 h), involucran un daño celular y/o tisular, una respuesta inflamatoria, compromiso mitocondrial, liberación de calcio, lesión endotelial, daño oxidativo y compromiso de los sistemas antioxidantes. Las lesiones agudas se comportan como una lesión de isquemia reperfusión (LIR). La ED es el resultado de una serie de efectos mecánicos, bioquímicos y metabólicos. Su fisiopatología se caracteriza por hipoxia celular y tisular, disfunción mitocondrial, cascadas inflamatorias, activación del complemento, daño por especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, consumo de antioxidantes y modificaciones epigenéticas.

En estos años, el mundo fue azotado por la pandemia de COVID-19, enfermedad causada por el SARS-CoV-2. Distintas actividades y profesiones se vieron afectadas, el buceo no fue la excepción. Las asociaciones médicas de la especialidad propusieron una serie de recomendaciones para prevenir el contagio durante la práctica del buceo y el regreso a éste, posterior al padecer COVID-19. Dos años después, continuamos aprendiendo de sus efectos agu-

---

\* MD, MSc, MPH, MAS, FACHM, DMO  
Director del Departamento de Medicina Hiperbárica, Hospital General Agustín O'Horan y Centro de Especialidades Médicas del Sureste, Mérida, Yucatán, México.  
Profesor de Posgrado de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
sanch263@msu.edu, cuau57@hotmail.com

dos y crónicos en los pulmones y las afectaciones sistémicas. En varios países, incluyendo Latinoamérica, se han realizado tratamientos para pacientes agudos y crónicos. La oxigenación hiperbárica (OHB) promueve la supervivencia del tejido marginal (penumbra), reduce el edema, rompe el círculo vicioso de edema-hipoxia-edema, favorece la microcirculación, reduce la expresión de las cascadas inflamatorias, promueve la cicatrización, fomenta la producción de factores de crecimiento, estimula la angiogénesis, tiene efectos antimicrobianos directos e indirectos, promueve efectos reológicos y estimula la movilización de las células madre desde la médula ósea. A un nivel más celular mantiene la producción de ATP, restablece la función mitocondrial, modifica el estado redox celular, reduce la producción de mediadores inflamatorios (biomarcadores), restablece la función moduladora de las citoquinas y la comunicación celular, modifica las cascadas de la LIR, reduce la producción de daño oxidativo, apoptosis, necroapoptosis y autofagia; restaura la función endotelial y de la matriz extracelular, reactiva al citoesqueleto y promueve la producción de factores antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos.

El único tratamiento médico disponible para la ED y considerado como el estándar de oro, es la OHB. Cuando analizamos los mediadores inflamatorios del COVID-19, se observa una similitud muy importante con los observados en otras patologías agudas, incluyendo la ED. Los efectos de la OHB modifican la evolución de la LIR y posiblemente del COVID-19 más allá de modificar solamente la hipoxia e hipoxemia. Esto hace que la OHB sea un tratamiento único para las condiciones que en su fisiopatología cursan con hipoxia celular, tisular o sistémica.

**Palabras Claves:** *enfermedad por descompresión, inflamación, lesión de isquemia reperfusión, disfunción mitocondrial y oxigenación hiperbárica.*

## Objetivos

Describir la fisiopatología y biomarcadores de la lesión por enfermedad por descompresión y realizar una comparación con los de la COVID-19. Resaltar la aplicación de la OHB en la fisiopatología y tratamiento de ambas lesiones.

## Procedimientos de seguridad

Se recomienda que todos los buzos científicos cuenten con un examen médico de aptitud para el buceo anual, realizado por un médico del buceo certificado y con competencia para ser certificador de buzos.

## Materiales y métodos

La interrupción aguda del flujo sanguíneo y/o oxigenación en el cuerpo es el gatillo para desencadenar una serie de cascadas inflamatorias que conforman

la lesión de isquemia reperusión (LIR), que puede generar un compromiso local y/o sistémico.<sup>1</sup> Como origen y resultado final se encuentra la isquemia y/o hipoxia que induce un estado pro inflamatorio que aumenta la vulnerabilidad de los tejidos durante la reperusión o reoxigenación.<sup>1</sup> Existen múltiples cascadas inflamatorias que interactúan entre ellas y pueden generar círculos viciosos en las primeras setenta y dos horas de evolución. El proceso es complejo con muchas vías que interactúan entre ellas y pueden generar círculos viciosos durante este periodo.<sup>1-5</sup>

Uno de los primeros efectos que encontramos por la presencia de burbujas en el cuerpo, es la activación del sistema inmune que reconoce a la burbuja como extraña o la desconoce como propia. La vía alterna del complemento (C3a y C5a) es la responsable de la activación, la iniciación de la inflamación, neutralización de los receptores (TLR), regulación de respuestas de anticuerpos, depuración de complejos inmunes y disrupción de las membranas celulares.<sup>6</sup> La activación del sistema de complemento se relaciona de manera directa con la presencia de sintomatología de ED.<sup>7</sup> Existen cambios en C3a en buceadores posterior a inmersiones con descompresión y especialmente con riesgo elevado de presentar enfermedad por descompresión ( $p < 0.001$ ).<sup>7-9</sup> La activación de complemento se emplea como indicador de estrés descompresivo y para el diagnóstico de enfermedad por descompresión.<sup>7</sup> También se emplea como indicador de daño endotelial, ya que su elevación es directamente proporcional a la magnitud del daño endotelial ocasionado por burbujas.<sup>10,11</sup>

Las microburbujas de nitrógeno ( $N_2$ ) y la interfase burbuja-sangre activan las plaquetas, fibrinógeno, globulinas plasmáticas y el sistema de coagulación. Ocasionan una reducción importante en la densidad de las plaquetas. Esta se relaciona con el tamaño de las burbujas, siendo las burbujas de 40-120  $\mu m$  las que tienen mayor poder agonista plaquetario.<sup>11-14</sup> En tiempo se forma una membrana alrededor de las burbujas, de 120  $\text{Å}$ , que contiene plaquetas, proteínas plasmáticas, anticuerpos y lípidos; creando una membrana semipermeable alrededor de la burbuja que dificulta el paso de los gases a través de ésta y su eliminación cuando se respira oxígeno (ventana de oxígeno de Behnke).<sup>15-18</sup> Se ha detectado trombos de fibrina-plaquetas dentro de los sinusoides venosos dilatados adyacentes a las burbujas.<sup>15</sup> También se ha encontrado monómeros de fibrina en el plasma.<sup>19</sup> En pacientes con lesiones neurológicas se presenta elevación del dímero D por arriba de 500  $\mu m$  ml-1.<sup>20</sup> Se ha encontrado embolismos grasos posterior a ED.<sup>21</sup> La activación de los sistemas de coagulación pueden ser tan severa que puede ocasionar coagulación intravascular diseminada (CID).<sup>19, 22, 23</sup> Existen cambios en homocisteína

y factores trombofílicos relacionados con la ED, no merecida.<sup>24</sup> Los cambios en el sistema de coagulación parecen ser menores cuando se realiza buceo con nitrox en lugar de con aire.<sup>25</sup>

Las burbujas en circulación ocasionan daño endotelial, síndrome de fuga capilar, extravasación de plasma y hemoconcentración.<sup>19</sup> Un hematocrito  $\geq 48\%$  se correlaciona con secuelas neurológicas persistentes al mes del accidente ( $p=0.01$ ) y es mayor al de los pacientes que no presentaron secuelas ( $p<0.05$ ).<sup>23</sup> Entre mayor sea el número y tamaño de las burbujas, mayor será el daño endotelial.<sup>11, 26, 27</sup> El daño mecánico modifica las uniones entre células endoteliales, aumenta la permeabilidad vascular y la subsecuente pérdida de líquidos del espacio vascular.<sup>12</sup> Asimismo, activa a las moléculas de adhesión endoteliales y de leucocitos (ICAM, VCAM, selectinas e integrinas).<sup>26-28</sup> La afectación de los sensores endoteliales de presión y estrés por flujo generan cambios bioquímicos que inician las cascadas inflamatorias y la tormenta citoquímica.<sup>29-32</sup> La tormenta citoquímica es seguida por una tormenta genómica y cambios epigenéticos en la célula.<sup>33</sup> La lesión endotelial aumenta la adhesión del neutrófilo en el endotelio siendo responsable de la mayor parte de la segunda fase de la lesión de IRI.<sup>28</sup> El daño endotelial severo ocasiona una respuesta sistémica que lleva al síndrome de respuesta inflamatoria sistémica (SRIS) a la falla orgánica múltiple (FOM).<sup>34</sup> Las burbujas circulantes con un diámetro mayor a  $20\ \mu\text{m}$  ocasionan daño en el endotelio pulmonar perdiendo su función de filtro de burbujas sobrecargando el ventrículo derecho y generando cambios hemodinámicos.<sup>26</sup> De manera sistémica puede afectar todos los sistemas endoteliales del cuerpo incluyendo hígado, corazón, ojo y la barrera hematoencefálica; generando edema y reducción del flujo cerebral en un 60-70%.<sup>28, 35-43</sup>

Se ha reportado la participación de micropartículas endoteliales (CD 14, 31, 41, 66b, 142, 235) en la fisiopatología de la ED generando una cascada inflamatoria y tormenta citoquímica con daño oxidativo. Existen diferencias estadísticamente significativas con relación al tiempo (15 min vs 2 h) en descanso o con actividad, siendo mayor a las 2 horas y en descanso.<sup>44-46</sup> También se ha reportado menor actividad de los centros de enucleación cuando se respira oxígeno o se somete a una terapia vibratoria u ambas. Siendo más eficiente la vibración.<sup>47</sup> Asimismo, existe sobreexpresión de vías inflamatorias medidas a través de microrreglos de transcritos (PI3K-AKT, malaria, artritis reumatoide, receptor c de lectina, expresión de proteínas de reconocimiento de patógenos (TLR) y citoquinas).<sup>48</sup>

Las cascadas inflamatorias que se activan en las ED ocasionan la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO's).<sup>3, 49</sup> El daño que éstas ocasionan son parte de la primera fase de la lesión de isquemia reperfusión generalmente mediada por la activación de la xantino oxidasa y la fosfolipasa A2, que activa a las lipo y ciclooxigenasas, la producción de leucotrienos, tromboxanos y prostaglandinas.<sup>3, 50, 51</sup> Aparentemente existe una relación entre las ERO's, especialmente la óxido nítrico sintetasas (NOS) y los centros de enucleación que parecen ser los sitios de origen de las burbujas endoteliales. El empleo de un bloqueador de NOS, L-NAME, reduce los centros de enucleación, la adhesión leucocitaria, modula el daño endotelial, modifica la tensión superficial, la producción de surfactante y la mortalidad. Existe una relación entre este efecto y el ejercicio físico realizado dentro de las últimas 20 horas previas antes de bucear.<sup>52-54</sup>

El proceso inflamatorio genera una falla energética y metabólica, de bomba de membrana y pérdida de la homeostasis de iones celulares, acidosis, inflamación, toxicidad excitatoria, daño oxidativo y consumo de antioxidantes. La falla en la producción de ATP por la mitocondria produce edema citotóxico, necrosis celular y liberación de calcio intracelular ( $Ca^{++}$ ), liberación de citocromo C y apertura del poro de transición mitocondrial que ocasiona disfunción mitocondrial.<sup>55-63</sup> La disfunción energética y liberación de calcio estimula la cascada de las xantinas,<sup>37, 64</sup> la cascada del ácido araquidónico (lipo y ciclooxigenasa),<sup>64, 65</sup> fomenta la producción de interleucinas 1-6 y factor de necrosis tumoral alfa,<sup>66, 67</sup> producción de glutamato,<sup>68, 69</sup> activación del factor de transcripción nuclear kappa B (NFkB),<sup>70</sup> producción de óxido nítrico sintetasa inducible (iNOS),<sup>71</sup> y la expresión de moléculas de adhesión endoteliales (ICAM-1) y de neutrófilos y PMN (selectinas, integrina  $\beta_2$ ).<sup>72-74</sup> La caída en la producción del ATP también afecta al citoesqueleto de los fibroblastos, la actividad de la actina, los microtúbulos, aumento de la proteína Tau y la endoglina (CD105).<sup>75-80</sup> En la Tabla 1, se muestran los mediadores inflamatorios identificados para COVID-19 y que en más del 80% son compartidos en la enfermedad por descompresión. Esto significa que la especificidad de la respuesta inflamatoria es independiente de la inespecificidad de la causa. La causa de la respuesta inflamatoria sistémica es totalmente distinta (virus vs burbujas), pero los mediadores de la respuesta son muy similares, lo que confirma una gran importancia de la lesión endotelial en la fisiopatología de ambas patologías.

Actualmente se considera que el mantenimiento del metabolismo aeróbico celular es la piedra fundamental del manejo adecuado y oportuno de la LIR,

entre ellas las ED. La OHB es un tratamiento que la inhibe cuando se emplea de manera oportuna.<sup>2, 75-81</sup> Actúa modificando la lesión mitocondrial, el metabolismo del calcio, la lesión endotelial, modula el daño oxidativo y promueve las defensas antioxidantes enzimáticas y no enzimáticas.<sup>2</sup> Se ha comprobado su utilidad en varias de las LIR como son ED, trauma agudo, quemaduras, intoxicación por monóxido de carbono, colgajos e injertos comprometidos, infarto agudo y COVID-19.<sup>2, 81-90</sup> La OHB incide en la parte medular de la fisiopatología de la LIR que es la hipoxia celular. Sin embargo, entre más oportuno sea el tratamiento, más eficaz será éste.<sup>2,91</sup>

**Tabla 1.** Mediadores inflamatorios del COVID-19 que en su mayoría son compartidos por la enfermedad por descompresión.  
(Sánchez EC. No Publicado)

<b>Tipo</b>	<b>Mediador</b>
Citoquinas	IL-1, IL-2, IL-6, IL-8, IL-10, IL-11, IL-12, IL-16, IL-17, IL-18, IL-22, IL-23, TNF4a, MCP-1
Quimoquinas	CCL2, CCL3, CCL5, CCL7, CCL122, CXCL8, CXCL9, CXCL10, MIP-1A, MIP-1B, MIP-2A, MIP-3A
Factores de crecimiento	TGFb, PDGF, VEGF
Factores de transcripción	NFkB, RACa, JAK, JUNb, Interferón (IFNa, IFNg)
Metaloproteasas	MMP-9
Proteínas Reconocimientos Patógenos	TLR-4, TLR-7
Sintetasas NO	iNOS
Quinasas	AKT, PI3K, MAPK
Moléculas de adhesión intercelular	ICAM-1, Caderinas, Catepsinas
Proteínas choque de calor	HSP-90
Factores apoptóticos	AP-1, BCL-2
Linfocitos	CD-1B, CD-1, CCD-4, CD-8, CD-25, CD-127, CD-200, Th-17
Vía de complemento	C3b

## Conclusiones

Las lesiones en las primeras 72 horas se comparten como LIR. Las enfermedades disbáricas (ED) son lesiones que se caracterizan por presentar hipoxia, isquemia, inflamación y disfunción energética y metabólica. Si el tratamiento no se establece de manera oportuna, el daño puede ser irreversible. La oxigenación hiperbárica ha demostrado ser un tratamiento eficaz para las ED y el COVID-19, al modificar su fisiopatología. Existe cada vez más evidencia de sus efectos favorables y actualmente es el único tratamiento aceptado y el estándar de manejo de las ED y para el COVID-19 agudo y crónico se encuentra en fase experimental.

## Bibliografía

1. Cadenas S. *ROS and redox signaling in myocardial ischemia reperfusion injury and cardioprotection*. Free radic Biol Med 2018; 117:76-89.
2. Sánchez EC. *Pathophysiology of ischemia-reperfusion injury and its management with hyperbaric oxygen (HBO): a review*. J Emerg Crit Care Med 2019:1-8.
3. Sánchez EC. *Hyperbaric oxygenation in peripheral nerve repair and regeneration*. Neurol Res 2007; 129:184-198.
4. Sánchez EC, Rincón JA. *La Enfermedad por Descompresión es una Lesión por Isquemia Reperusión*. En: Medicina del Buceo. Mauvecin G, Espinosa C. Argentina 2011.
5. Tasoulis MK, Douzinas, EE. *Hypoxemic reperfusion of ischemic states: an alternative approach for the attenuation of oxidative stress mediated reperfusion injury*. J Biomed Sci 2016; 23:7.
6. Thompson LA, Hindle AG, Black SR, Romano TA. *Variation in the hemostatic complement (C5a) response to in vitro nitrogen bubbles in monodontids and phocids*. J Comp Physiol B. 2020;190(6):811-822.
7. Pekna M, Ersson A. *Complement system response to decompression*. Undersea Hyperb Med 1996;23(1):31-34.
8. Ward CA, McCullough D, Fraser WD. *Relation between complement activation and susceptibility to decompression sickness*. J Appl Physiol 1987; 62(3):1160-1166.
9. Nyquist P, Ball R, Sheridan MJ. *Complement levels before and after dives with a high risk of DCS*. Undersea Hyperb Med 2007; 34(3):191-197.
10. Stevens DM, Gartner SL, Pearson RR, Flynn ET, Mink RB, Robinson DH, Dutka AJ. *Complement activation during saturation diving*. Undersea Hyperb Med 1993; 20(4):279-288.
11. Nossum V, Hjelde A, Bergh K, Brubakk AO. *Lack of effect of anti-C5a monoclonal antibody on endothelial injury by gas bubbles in the rabbit after decompression*. Undersea Hyperb Med 2000; 27(1):27-35.

12. Huang KL, Lin YC. *Activation of complement and neutrophils increases vascular permeability during air embolism.* Aviat Space Environ Med 1997; 68(4):300-305.
13. Boussuges A, Succo E, Juhan-Vague I, Saintry JM. *Activation of coagulation in decompression illness.* Aviat Space Environ Med 1998; 69(2):129-132.
14. Levin LL, Stewart GJ, Lunch PR, Bove AA. *Blood and blood vessel wall changes induced by decompression sickness in dogs.* J Appl Physiol 1981; 50(5):944-949.
15. Behnke AR, Shaw LA, Messer AC, Thomson RM, Motley EP. *The circulatory and respiratory disturbances of acute compressed-air illness and the administration of oxygen as a therapeutic measure.* Am J Physiol 1936; 114:526-533.
16. Thorsen T, Dalen H, Bjerkvig R, Holmsen H. *Transmission, and scanning electron microscopy of N2 microbubble-activated human platelets in vitro.* Undersea Biomed Res 1987;14(1):45-58.
17. Arieli R. *Fatty diet, active hydrophobic spots, and decompression illness.* Diving Hyperb Mex 2018; 48(3):197.
18. Lehto VP, Kantola I, Tervo T, Laitinen LA. *Ruthenium red staining of blood-bubble interface in acute decompression sickness in rat.* Undersea Biomed Res 1981; 8(2):101-111.
19. Jones JP Jr, Ramirez S, Doty SB. *The pathophysiologic role of fat in dysbaric osteonecrosis.* Calin Orthop Relat Res 1993; 296:256-264.
20. Boussuges A, Blanc P, Molenat F, Bergmann E, Saintry JM. *Haemoconcentration in neurological decompression illness.* Int J Sports Med 1996; 17(5):351-355.
21. Kitano M, Hayashi K. *Acute decompression sickness- report of an autopsy case with widespread fat embolism.* Acta Pathol Jpn 1991; 31(2):269-276.
22. Hart GB. *Screening test for decompression sickness.* Aviat Space Environ Med 1976; 47(9):993-994.
23. Marabotti C, Chiesa F, Scalzini A, Antonelli F, Lari R, Frnachini C, Data PG. *Cardiac and humoral changes induced by recreational SCUBA diving.* Undersea Hyperb Med 1999; 26 (3):151-158.
24. Candito M, Candito E, Chatel M, van Obberghen E, Dunac A. *Homocysteinemia and thrombophilic factors in unexplained decompression sickness.* Rev Neurol (Paris) 2006; 162(8-9): 890-894.
25. Baj Z, Olszanski R, Majewska E, Konarski M. *The effect of air and nitrox diving on platelet activation tested by flow cytometry.* Aviat Space Environ Med 2000; 71(9): 925-928.
26. Martin JD, TOM SR. *Vascular leukocyte sequestration in decompression sickness and prophylactic hyperbaric oxygen therapy in rats.* Aviat Space Environ Med 2002; 73(6): 565-569.
27. Nossum V, Koteng S, Brubakk AO. *Endothelial damage by bubbles in the pulmonary artery of pigs.* Undersea Hyperb Med 1999; 26(1): 1-812.

28. Helps SC, Parsons DW, Reilly PL, Gorman DF. *The effect of gas emboli on rabbit cerebral blood flow*. Stroke 1990; 21(1): 94-99.
29. Grundy S, Bentley A, Tschopp J. *Primary spontaneous pneumothorax: a diffuse disease of the pleura*. Respiration 2012; 83(3): 185-189.
30. Michell DL, Andrewa KL, Woollard KJ, Chin-Dustin JP. *Imaging leukocyte adhesion on the vascular endothelium at high intraluminal pressure*. J Vis Exp 2011;54: e3221.
31. Fang HY, Lin CY, Chow KC, Huang HC, Ko WJ. *Microarray detection of gene overexpression in primary spontaneous pneumothorax*. Exp Lung Res 2010;36 (6): 323-330.
32. Montcalm-Smith E, Caviness J, Chen Y, McCarron RM. *Stress biomarkers in a rat model of decompression sickness*. Aviat Space Environ Med 2007; 78 (2): 87-93.
33. Xiao W, Mindrinos MN, Seok J, Cushieri J, Cuenca AG, et al. *Genomic storm in critically injured humans*. J Exp Med 2011; 208 (13): 2581-2590.
34. Bone RC. *Immunologic dissonance: A continuing evolution in our understanding of the systematic inflammatory response syndrome (SIRS) and multiple organ dysfunction syndrome (MODS)*. Ann Inter Med 1996; 125:680-686.
35. Boussuges A, Blanc F, Carturan D. *Hemodynamic changes induced by recreational SCUBA diving*. Chest 2006; 29 (5): 1337-1343.
36. Chryssanthou C, Springer M, Lipschitz S. *Blood-brain, and blood-lung barrier alteration by dysbaric exposure*. Undersea Biomed Res 1977; 4 (2): 117-129.
37. Yamaguchi S, Yamakawa T, Niimi H. *Cerebral microvascular response to air embolism-reperfusion in the cat using fluorescence videomicroscopy*. Clin Hemorheol Microcirc 2003; 28 (1): 59-70.
38. Hills BA, James PB. *Microbubble damage to the blood brain barrier: relevance to decompression sickness*. Undersea Baromed Res 1991;18 (2): 111-116.
39. Meng WT, Qing L, Li CZ, Zhang K, Yi HJ, et al. *Ulinastatin: a potential alternative to glucocorticoids in the treatment of severe decompression sickness*. Front Physiol 2020; 11:273.
40. Bigley NJ, Perymon H, Bowman GC, Hull BE, Stills HF, Henderson RA. *Inflammatory Cytokine, and cell adhesion molecules in a rat model of decompression sickness*. J Interferon Cytokine Res 2008; 28(2): 55-63.
41. Ersson A, Linder C, Ohlsson K, Ekholm A. *Cytokine response after acute hyperbaric exposure in the rat*. Undersea Hyperb Med 1998; 25(4): 217-221.
42. L'Abbate A, Kusmic C, Matteucci M, Pelosi G, et al. *Gas embolization of the liver in a rat model of rapid decompression*. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 2010; 299(2): R673-R682.
43. Liu K, Ji K, Guo L, Lu H, Shan P, Yan C. *Mesenchymal stem cells rescue injured endothelial cells in an in vitro ischemia-reperfusion model via tunneling nanotube like structure-mediated mitochondrial transfer*. Microvasc Res 2014; 92:10-18.

44. Thom SR, Milovanova T, Bogush M, Yang M, et al. *Microparticle production, neutrophil activation and intravascular bubbles following open-water SCUBA diving.* J Appl Physiol 2012; 112(8): 1268-1278.
45. Thom SR, Milonova TN, Bogush M, Yang M, et al. *Bubbles, microparticles and neutrophil activation changes with exercise and breathing gas during open-water SCUBA diving.* J Appl Physiol 2013; 114 (10): 1396-1405.
46. Thom SR, Bennett M, Banham ND, Chin W, et al. *Association of microparticles and neutrophil with decompression illness.* J Appl Physiol 2015; 119 (5): 427-434.
47. Balestra C, Theunissen S, Papadopoulou V, Le Mener C, et al. *Pre-Dive whole body vibration better reduces decompression-induced vascular gas emboli than oxygenation or a combination of both.* Front Physiol 2016; 7: 586.
48. Magri K, Eftedal I, Magri VP, Matiti L, Azzopardi CO, et al. *Acute effects of the peripheral blood transcriptome of decompression sickness secondary to SCUBA diving.* Frontiers Physiol 2021; 12: 660-402.
49. Sánchez EC, Rincón JA, Korrodi AIII, Chávez A. *Lesión de Isquemia Reperfusión e Infarto Cerebral.* En: *Neuroanestesia y Terapia Intensiva Neurológica* Eds. Carrillo R. Vázquez A. Editorial Alfil, 2008: 519-528.
50. Kurt B, Kurt Y, Kaslioglu Y, Topal T, et al. *Effects of hyperbaric oxygen on energy production and xanthine oxidase levels in striated muscle tissue of health rats.* J Clin Neurosci 2008;15(4): 445-450.
51. McCord JM. *Oxygen-derived free radicals in postischemic tissue injury.* N Engl J Med 1985; 312(3): 159-163.
52. Winsloff U, Richardson RS, Brubakk O. *NOS inhibition increases bubble formation and reduces survival in sedentary but not exercised rats.* J Physiol 2003; 546:577-582.
53. Winsloff U, Richardson RS, Brubakk O. *Exercise, and nitric oxide prevents bubble formation* 2004; 555: 825-829.
54. Duplessis CA, Fothergill D. *Investigating the potential of statin medications as a nitric oxide (NO) release agent to decrease decompression sickness: a review article.* Medical Hypotheses 2008; 70(3): 560-566.
55. Macdonald RL, Stoodley M. *Pathophysiology of cerebral ischemia.* Neurol Med Chir (Tokyo) 1998; 38(1): 1-11.
56. Penttilä A, Trump BF. *The role of cellular membrane systems in shock.* Science 1974; 185:277.
57. Shin TH, Lee DY, Basith S, Manavalan B, et al. *Metabolome changes in cerebral ischemia.* Cells 2020; 9(7): 1630.
58. Nicholls DG, Budd SL. *Mitochondria and neuronal survival.* Physiol Rev 2000; 80(1): 315-360.
59. Jacobson J, Duchon MR, Hothercall J, Clark JB, Heales SJ. *Induction of mitochondrial oxidative stress in astrocytes by nitric oxide precedes disruption of energy metabolism.* J Neurochem 2005; 95(2): 388-395.

60. Hsieh YS, Shin YK, Seol GH. *Protection of the neurovascular unit from calcium-related ischemic injury by linalyl acetate*. Chin J Physiol 2021; 64(2): 88-96.
61. Mayor D, Tymianski M. *Neurotransmitters in the mediation of cerebral ischemic injury*. Neuropharmacology 2018; 134 (Pt B): 178-188.
62. Morley P, Hogan MH, Hakim AM. *Calcium mediated mechanisms of ischemic injury and protection*. Brain Pathol 1994; 4:37-47.
63. Simon JN, Vrellaku B, Monterisi S, Chu SM, et al. *Oxidation of protein kinase A regulatory subunit PKAR1a protects against myocardial ischemia-reperfusion injury by inhibiting lysosomal-triggered calcium release*. Circulation 2021;143 (5): 449-465.
64. Muralikrishna Adibhatla R, Hatcher JF. *Phospholipase A2, reactive oxygen species, and lipid peroxidation in cerebral ischemia*. Free Radical Biol Med 2006; 40(3): 376-387.
65. Adibhatla RM, Hatcher JF, Dempsev RJ. *Phospholipase A2, hydroxyl radicals, and lipid peroxidation in transient cerebral ischemia*. Antioxid Redox Signal 2003; 5(5): 647-654.
66. Caso JR, Moro MA, Lorenzo P, Lizasoain I, Leza JC. *Involvement of IL-1beta in acute stress-induced worsening of cerebral ischaemia in rats*. Eur Neuropsychopharmacol 2007;13.
67. Hassan M, Ali FE, Shalkami AG. *Role of TLR-4/IL-6/TNF  $\alpha$ , COX-II and eNOS/iNOS pathways in the impact of carvedilol against hepatic ischemia reperfusion injury*. Hum Exp Toxicol 2021; 40(8): 1362-1373.
68. Nicholls DG, Johnson-Cadwell L, Vesce S, Jekabsons M, Yadava N. *Bioenergetics of mitochondria in cultured neurons and their role in glutamate excitotoxicity*. J Neurosci Res 2007; 17(9): 600-607.
69. Kahlert S, Reiser G. *Glial perspectives of metabolic states during cerebral hypoxia-calcium regulation and metabolic energy*. Cell Calcium 2004; 36(3-4): 295-302.
70. Schwaninger M, Inta I, Herrmann O. *NF-kappab signaling in cerebral ischemia*. Biochem Soc Trans 2006; 34(6): 1291-1294.
71. Nanetti L, Taffi R, Vignini A, Moroni C, Raffaelli F, Bachetti T, Silvestrini M, Provinciali L, Mazzanti L. *Reactive oxygen species plasmatic levels in ischemic stroke*. Moll Cell Biochem 2007 ; 303(1-2):19-25.
72. Blum A, Khazim K, Merei M, Peleg A, Blum N, Vaispapir V. *The stroke trial – can we predict clinical outcome of patients with ischemic stroke by measuring soluble cell adhesion molecules (CAM)?* Eur Cytokines Netw 2006; 17(4): 295-298.
73. Wang JY, Zhou DH, Li J, Zhang M, Deng J, Gao C, Li J, Lian Y, Chen M. *Association of soluble intercellular adhesion molecule 1 with neurological deterioration of ischemic stroke: The Chongqing Stroke Study*. Cerebrovasc Dis 2006; 21(1-2): 67-73.
74. Caimi G, Canino B, Ferrara F, Montana M, Musso M, Porretto F, Carollo C, Catania A, LoPresti R. *Granulocyte integrins before and after activation in acute ischemic stroke*. J Neurol Sci 2001; 186(1-2): 23-26.

75. Jang DH, Owiredu S, Ranganathan A, Eckmann DM. *Acute decompression following simulated dive conditions alter mitochondrial respiration and motility.* AM J Physiol Cell Physiol 2018; 315(5): C699-C705.
76. Rosen A, Genner M, Ocarsson N, Kvarström, et al. *Protein tau concentration in blood increases after SCUBA diving: an observational study.* Eur J Appl Physiol 2022; 122(4): 993-1005.
77. Mitra A, Venkatachalapathy S, Ratna P, Wang Y, Jokhun DS, Shivashankar GV. *Cell geometry dictates TNF -induced genome response.* Proc Natl Acad Sci USA 2017; 114(20): E3882-E3891.
78. Zhang K, et al. *Endothelial dysfunction correlates with decompression bubbles in rats.* Sci Rep 2016; 6: 33390.
79. Liu Y, Paauwe M, Nixon AB, Lukas J, et al. *Endoglin targeting: lessons learned and questions that remain.* Int J Mol Sci 2021; 22(1): 147.
80. Rossi E, Pericacho M, Bachelot-Loza C, Pidard D, et al. *Human endoglin as a potential new partner involved in platelet endothelium interactions.* Cell Mol Life Sci 2018; 75 (7): 1269-1284.
81. Buras J. *Basic mechanisms of hyperbaric oxygen in the treatment of ischemia-reperfusion injury.* Int Anesthesiol Clin 2000; 38: 91-109.
82. Moon R. *Hyperbaric Oxygen Therapy: A Committee Report.* Undersea and Hyperbaric Medical Society. 2019.
83. Kjellberg A, De Maio A, Lindholm P. *Can hyperbaric oxygen safely serve as an anti-inflammatory treatment for COVID-19.* Med Hypotheses 2020; 144: 110224.
84. Yanagawa Y. *Current status of hyperbaric oxygen therapy for COVID-19.* Acute Med Surg 2021; 8(1): e678.
85. Canellotto M, Duarte M, Keller G, Larrea R, Cunto E, et al. *Hyperbaric oxygen as an adjuvant treatment for patients with COVID 19 severe hypoxemia: a randomized controlled trial.* Emerg Med J 2022; 39: 88-93.
86. Doykov I, Hällqvist J, Gilmour KC, Grandjean L, et al. *The long tail of COVID-19 – the detection of prolonged inflammatory response after a SARS-CoV-2 infection in asymptomatic and mildly affected patients.* F1000 Research 2021; 9:1349.
87. Bhaiyat AM, Sasson E, Wang Z, Khairy Z, Et al. *Hyperbaric oxygen treatment for long coronaviruy disease-19; a case report.* J Medical Care Rep 2022; 16:80.
88. Robbins T, Gonevski M, Clark C, Baitule S, et al. *Hypoerbaric oxygen therapy for the treatment for long COVID: early evaluation of highly promising intervention.* Clinical Med 2021; 21(6): e629-632.
89. Kjellberg A, Douglas J, Pawlik MT, Kraus M, et al. *Randomized controlled open label multicenter clinical trial to explore safety and efficacy of hyperbaric oxygen for preventing ICU admission, morbidity, and mortality in adult patients with COVID-19.* BMJ Open 2021;11: e046738.

90. Quintar G, Beron JA, Román RO, Quintar JG, et al. *Terapia de oxígeno hiperbárico en pacientes SARS-CoV-2 con distinto grado de severidad clínica*. Rev Arg Ter Int 2021; 38.
91. García L, Sánchez EC. *Terapia con oxigenación hiperbárica, conceptos básicos*. Gaceta Médica de México 2000; 136: 45-56.



## Consideraciones antes, durante y después del buceo científico

---

Andrés López Pérez \*  
 Rebeca Granja Fernández\*\*  
 Omar Valencia Méndez\*\*\*  
 Pedro Medina Rosas\*\*\*\*  
 Virgilio Antonio Pérez\*\*\*\*\*

---

### Introducción

Los científicos o aquellos que se están entrenando para serlo deben desarrollar distintas habilidades dependiendo de la naturaleza de las actividades que desempeñan, además de las propiamente asociadas a la generación de conocimiento científico. Es decir, ingenieros, médicos, químicos, arqueólogos o biólogos deben pasar por un robusto entrenamiento respecto al diseño y aplicación de un método falsacionista (i.e., método científico) que les permita

- 
- \* Laboratorio de Ecosistemas Costeros/Laboratorio de Arrecifes y Biodiversidad (ARBIOLAB)  
 Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma, 1ª. Sección. Alcaldía Iztapalapa CP 09310, Ciudad de México
  - \*\* Investigadora Posdoctoral. Programa de Maestría en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas (BIMARENA)/ Laboratorio de Ecología Molecular, Microbiología y Taxonomía (LEMITAX), Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA),  
 Universidad de Guadalajara, Camino Ramón Padilla Sánchez  
 No. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco, México, 45200
  - \*\*\* Departamento de Ecología Marina, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana # 3918, Zona Playitas, 22860, Ensenada, Baja California, México
  - \*\*\*\* Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa. Puerto Vallarta, Jalisco
  - \*\*\*\*\* Buceo Huatulco, Ocotillo # 206, La Crucecita, Bahías de Huatulco, Oaxaca, 70989, México

relacionar observaciones (cosas que sabemos) a modelos (lo que pensamos que explica las observaciones), a hipótesis (predicciones acerca de lo que podría pasar bajo nuevas circunstancias si el modelo es correcto) y a experimentos para poner a prueba las predicciones<sup>1</sup>. Adicionalmente, en no pocas situaciones, la experimentación o varios de los componentes del método científico se llevan a cabo en entornos en donde los humanos no pueden sobrevivir sin equipo o accesorios que les ayuden a permanecer en situaciones extremas o adversas, y que demandan de los científicos conocimientos y habilidades, por ejemplo, para manejar fauna salvaje, escalar, viajar al espacio o bucear.

Las actividades de buceo implican el uso de equipo que permite a los humanos mantenerse bajo el agua y respirar por periodos limitados por el tiempo de buceo y por profundidad restringidos a algunos minutos y profundidades que no superen los 30 metros<sup>2</sup>. A pesar de esto, existen recursos para llegar a permanecer algunas horas bajo el agua y hasta alrededor de 100 metros de profundidad, con un entrenamiento más sofisticado. Estas actividades implican el uso de un equipo básico, que incluye un visor, aletas y *snorkel*, además de un tanque con aire o mezcla de gases, un regulador que permita respirar adecuadamente su contenido y un dispositivo que facilite la flotación adecuada en el agua; además de instrumentos que permitan conocer varios elementos como el tiempo de inmersión, profundidad y cantidad de aire.

Cuando se bucea para realizar una actividad científica, de investigación o educativa, se está llevando a cabo lo que por definición se conoce como buceo científico<sup>3</sup>. La observación del entorno acuático y lo que en él ocurre, así como la obtención de datos son, quizá, las actividades más comunes dentro del buceo científico. Desde el desarrollo del equipo autónomo de respiración bajo el agua (SCUBA, por sus siglas en inglés)<sup>4</sup>, observar y obtener datos en el ambiente acuático ha incrementado en número, en tipo y en alcance por lo que cada buceo se vuelve específico y con objetivos muy particulares o únicos. Esto demanda de una planeación científica y de buceo específico por parte de quienes lo realizan.

La presente contribución surge de la experiencia científica y de buceo de los autores, además de la retroalimentación y de lo aprendido durante la impartición de los Diplomados de Buceo Científico de la Universidad Autónoma Metropolitana y de diversos cursos de certificación de buceo (Professional Association of Diving Instructors, PADI; International Association of Nitrox and Technical Divers, IANTD). La contribución no pretende ser un compendio de las normas, estándares o protocolos de seguridad del buceo científico, sino llamar la atención respecto a varios aspectos que deben considerarse

antes, durante y después de realizar buceo científico y que podrán seguirse de manera transversal a cualquier actividad científica que emplee buceo.

## **Antes**

Por su naturaleza, el buceo científico involucra dos aspectos: ciencia y buceo que, aunque momentáneamente se llevan a cabo de manera paralela para lograr un fin (i.e., mayormente observación y obtención de datos en ambientes acuáticos), obedecen a lógicas con normas, estándares y protocolos distintos. Reconocer esta diferencia y la necesidad de poner el mayor cuidado a ambas es de vital importancia. Por el lado de la ciencia, debe existir un entendimiento de la naturaleza, lógica, orden y requisitos de la experimentación de forma que la validez científica de la observación o de los datos obtenidos mediante buceo, pueda ser identificada o que sus deficiencias puedan ser reconocidas. Numerosos textos han sido escritos respecto al método científico (se invita a los lectores a familiarizarse con el texto de su elección), aunque los autores reconocen gran valía a los documentos publicados por Underwood<sup>1</sup> donde se describen de manera detallada y sencilla los componentes del método; se llama la atención respecto a la naturaleza y necesidad de la replicación<sup>5</sup>, al diseño experimental y de muestreo para controlar las fuentes de variación<sup>6,7</sup>. Una vez que el diseño experimental y de muestreo es el adecuado para la evaluación crítica de la hipótesis nula<sup>1</sup>, la parte científica o de investigación que debe llevarse a cabo mediante buceo debe planearse.

Como puede leerse en la sección III del presente manual, numerosas metodologías de investigación en buceo científico han sido y están siendo empleadas por investigadores y grupos de trabajo en Latinoamérica, cada una de las cuales debe ser planeada y ejecutada con el mayor de los cuidados. Herramientas e insumos de trabajo bajo el agua y fuera de ella (cuadrantes, transectos, cámaras, bolsas, tablas, lápices, hieleras, reactivos, y un variado y extenso etcétera de acuerdo con la actividad realizada) y la asignación explícita de roles (cuáles y cuántos buzos participarán, quién hará qué actividad y en qué orden se hará) son fundamentales para completar la actividad científica.

Por el lado del buceo, las normas, los estándares y los protocolos de seguridad (ver secciones I y II<sup>3</sup>) deben regir y ser de observancia y aplicación obligatoria en toda actividad científica, de investigación o educativa llevada a cabo al amparo de lo que se reconoce como buceo científico<sup>4,8</sup>. De relevancia será empatar las actividades de investigación con las normas, estándares y protocolos de seguridad. Así la sección informativa (o *briefing*) del buceo debe hacer explícita la planeación del buceo en términos científicos y de segu-

ridad, por lo que elementos como la viabilidad del sitio buceo (profundidad, fácil acceso, etc.), tiempo, roles, llenado de tanques, e inclusive una correcta planeación de alimentación e hidratación, así como qué hacer en caso de una emergencia mientras se desarrolla la actividad deben ser cuidadosamente revisados. En este sentido, es importante considerar la experiencia y habilidad de cada persona, de manera que sea adecuada a la actividad que se va a realizar, que el número de personas sea acorde a lo que se propone completar y que el equipo sea el adecuado para la actividad. Cada persona involucrada en la actividad particular a realizar debe saber su papel y cumplirlo hasta que se complete el objetivo. Eso incluye no solamente a los que bucearán, sino las personas que se quedan en la embarcación y las personas en tierra relacionadas directa o indirectamente con las actividades a realizar.

Idealmente, debe existir redundancia y amplia experiencia en el grupo de buzos para poder cubrir varias actividades, aunque solo se realicen unas cuantas en la misión específica, considerando, por ejemplo, que en caso de que alguien no pueda completar cierta actividad alguien más la pueda realizar, además de que en todo momento se garantice la seguridad de cada uno de los participantes de la actividad, de los datos o muestras a obtener, así como del ambiente que se visita.

Respecto al buceo, los protocolos de preinmersión respecto a la revisión del armado y funcionamiento adecuado de equipo básico y SCUBA deben ser seguidos en todo momento previos a cada inmersión por cada participante de manera personal, con la pareja correspondiente y con el grupo total de buzos. Tener claro el objetivo del buceo permite que los participantes logren completar las actividades de manera segura, donde la comunicación a lo largo del buceo (respecto al consumo de aire, posibles problemas físicos u operativos, etc.), desde el descenso hasta el ascenso, es primordial.

## **Durante**

Por la naturaleza de la actividad, el buceo con fines científicos requiere de la participación activa de todos los involucrados, desde el personal de apoyo en tierra o el asociado a cualquier plataforma desde la que se vaya a llevar a cabo la actividad, hasta los propiamente involucrados en el buceo.

Hay actividades que se realizan desde el litoral, sin requerir una embarcación para su traslado, como las inmersiones realizadas desde la playa o muelle. Otras requieren de una embarcación pequeña, como las llevadas a cabo en zonas costeras. Finalmente, pueden llevarse a cabo inmersiones desde una

embarcación de eslora de varias decenas de metros con autonomía para realizar actividades por varios días, como las llevadas a cabo en áreas oceánicas. En cada caso, las actividades que realizan tanto buzos como las personas que se quedan en la superficie del agua con equipo básico, en la embarcación sin entrar al agua o incluso en tierra, debe ser considerada y valorada para garantizar la seguridad de la misión final de cada buceo científico.

Desde el punto de vista científico, una lista de verificación o comprobación (*checklist*) de insumos, material, equipo, herramientas, repuestos y, en general, todo lo necesario para llevar a cabo la actividad científica, de investigación o educativa debe ser necesaria. Debe ponerse cuidado en cómo colocar y sujetar equipo, herramientas, material e insumos de trabajo de forma tal que no se comprometa la seguridad del buzo, que no se desprendan, pierdan o rompan, que se garantice un acceso fácil y que permita llevar a cabo de manera eficiente la actividad científica planeada; opciones de clips, abrazaderas, mosquetones, cuerdas, etc., de distintos materiales y tamaños están disponibles en el mercado para tal fin. En no pocas ocasiones, la actividad científica puede interrumpirse por un lápiz, cámara, marca o herramienta perdida que no fue adecuadamente asegurada o que nunca fue considerada. Finalmente, pero no menos importante, se debe seguir estrictamente el plan científico de buceo y mantener comunicación constante con el resto del grupo de trabajo en caso de que sean necesarios ajustes, tanto bajo el agua como en la embarcación.

## **Después**

Luego del buceo, es esencial reducir riesgos y garantizar la seguridad de todos los elementos involucrados en la misión, desde el equipo de buceo hasta las muestras o datos, incluidos obviamente todos los buzos, con un seguimiento de minutos hasta horas o días para garantizar que no hay complicaciones derivadas de la actividad del buceo científico, de otra forma, el fin del buceo científico no se habrá alcanzado.

Dependiendo de la plataforma desde donde se realice la inmersión y de la naturaleza de la actividad que se haya desarrollado, los roles podrían ser asignados para lavar y ordenar equipo, recargar aire o para el inmediato procesamiento de muestras. Pasar datos en computadora, libreta de campo, descargar fotografías, videos o datos, y preparar equipo para la sesión del mismo o siguiente día es, en muchos casos, lugar común. Así, las actividades relacionadas con el buceo científico no terminan cuando la persona emerge del ambiente acuático ya que, en la mayor parte de los casos, continúa hasta

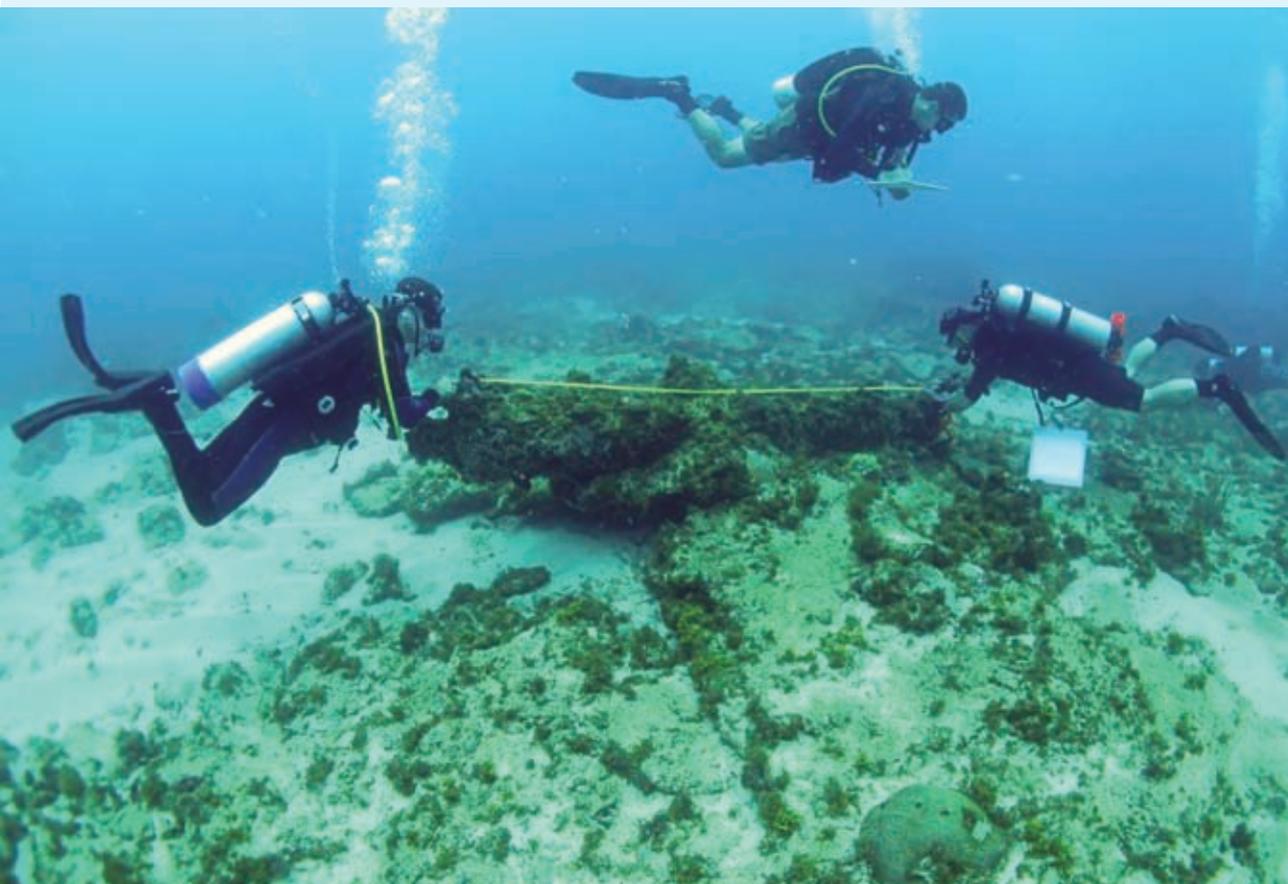
entrada la noche o incluso varios días después si el procesamiento de las muestras o datos lo requiere.

## Consideraciones finales

Para realizar actividades que implican buceo científico es necesario poseer conocimientos y habilidades en dos vertientes: la ciencia y el buceo. La deficiencia o desconocimiento de uno u otro, podría comprometer el éxito de la investigación o la seguridad de los buzos. Es relevante el conocimiento previo (biología, ecología, etc.), el diseño experimental y de muestreo a utilizar, así como conocer las herramientas y técnicas que ayuden a cumplir con el objetivo propuesto. Respecto al buceo, se adquiere experiencia derivada de varias decenas o centenas de buceos deportivos, recreativos o de preparación y no solo a través de cursos de buceo, además de la que se gana con la participación en diferentes misiones y salidas. Una planeación incorrecta del antes, durante y después del buceo puede redundar en la incapacidad para evaluar críticamente la hipótesis de trabajo, podría resultar en pérdidas considerables de dinero y, en el peor de los escenarios, en accidentes de buceo o pérdidas humanas.

## Bibliografía

1. Underwood, A.J. *Components of design in ecological field experiments*. Ann. Zool. Fennici 46:93-111 (2009).
2. PADI (Professional Association of Diving Instructors). *Open water diver manual* (2021).
3. AAUS (American Academy of Underwater Sciences). *Standards for scientific diving*. Available at [www.aaus.org/About/DivingStandards](http://www.aaus.org/About/DivingStandards) (2019).
4. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). *Diving Manual National Oceanic and Atmospheric Administration*. US Department of Commerce. 800 pp (2017).
5. Hurlbert, S.J. *Pseudoreplication and the design of ecological field experiments*. Ecol. Monogr. 54:187-211 (1984).
6. Cochran, W.G., & G.M. Cox. *Experimental designs*. Second edition. Wiley, New York, New York, USA (1957).
7. Underwood A.J. *Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1997).
8. Heine, J.N. *Scientific Diving Techniques. A practical guide for the research diver*. BPC. 232 pp. (2011).



## **Técnicas y procedimientos de buceo científico**



## Técnicas para el desarrollo del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia – SIMAC

---

Raúl Navas-Camacho\*

---

### Introducción

Los arrecifes coralinos son estructuras tridimensionales que modifican dramáticamente el fondo marino alcanzando tamaños ciclópeos, capaces de alterar la dirección y energía de corrientes marinas y de esta manera proteger la integridad las costas en frente de ellas del embate del mar, generando, además, una amplia variedad de bienes y servicios para el medio marino y los seres humanos (Burke et al., 2011). El término “coral” no tiene significancia taxonómica y suele agrupar a los organismos pertenecientes a la clase Anthozoa. Los arrecifes coralinos son formados por un sinnúmero de colonias de coral que juntas generan las estructuras masivas que los componen y son creadas por diminutos seres llamados pólipos. Los pólipos son organismos primitivos gelatinosos y generalmente carentes de color que se asocian con algas microscópicas (zooxantelas) y gracias a ello obtienen su color característico, liberan oxígeno y secretan carbonato de calcio, siendo por esto conocidos como corales duros o escleractineos (Prahl y Erhardt, 1985; 3 Díaz et al., 2000; 4 Reyes et al. 2010). Son propios de aguas someras y cálidas, por lo que se les observa más comúnmente alrededor de los trópicos por todo el mundo, principalmente en zonas costeras, pero llegando incluso a tener presencia a los 6.000 m en los que la luz está ausente y por ende sus zooxantelas (Murray Roberts et al., 2009). Para Colombia se conocen 19 familias y 153 especies de corales escleractinios: 118 del Caribe (57 zooxantelados, 65 azooxantelados, cuatro especies existen de ambas formas) y 37 del Pacífico (20 zooxantelados, 17 azooxantelados), con dos especies de azooxanteladas en común entre ambos mares (4 Reyes et al., 2010).

---

\* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. Santa Marta, Colombia

Los arrecifes coralinos pueden tener miles de kilómetros de extensión y generan entre otros beneficios: oxígeno que exportan al medio y para su autoconsumo, hábitat, alimento y protección para más del 25 % de las especies marinas (Príncipe et al., 2011). Son muchos los bienes y servicios que le brindan a la humanidad generando desde protección costera hasta generación de divisas por buceo y turismo. Siendo a la vez epicentros de biodiversidad y valor paisajístico por su belleza que les confiere valor económico y ecológico, convirtiéndolo en el ecosistema marino más emblemático de la humanidad. Desde hace algunas décadas los arrecifes de todo el mundo han venido sufriendo un deterioro permanente y continuo debido al cada vez mayor deterioro ambiental a través de blanqueamiento, enfermedades entre otras (Gil-Agudelo et al., 2009; 8 Navas-Camacho et al., 2010a; Navas-Camacho et al., 2010b), habiéndose perdido ya cerca de un 20 % de la cobertura viva coralina del mundo (Burke et al., 2011). Por esta razón se hace necesario establecer sistemas de monitoreo continuo que permitan saber el estado del ecosistema y poder implementar acciones de manejo, así como normativas que propendan por la protección, conservación y preservación de los corales y arrecifes coralinos en todo el planeta. Estos monitoreos se realizan mediante inmersiones con equipos de buceo autónomo con diferentes grados de complejidad.

## **Objetivos**

En este capítulo se describen las técnicas para el montaje de estaciones permanentes de monitoreo de corales escleractineos, así como los protocolos para realizar el monitoreo sin generar deterioro en las colonias. Entre dichos protocolos se encuentran como establecer los cambios en la cobertura de los principales componentes de fondo, el crecimiento o pérdida de cobertura de coral vivo, la expansión del componente algal, la prevalencia de enfermedades o blanqueamiento y la riqueza y abundancia de peces arrecifales para establecer su estructura poblacional.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Para realizar el monitoreo SIMAC se siguen los procedimientos estándar del buceo científico en aguas abiertas. Los equipos de buceo y seguridad reciben mantenimiento preventivo continuamente por personal capacitado para la seguridad de los investigadores. Existen normas sobre en qué condiciones ambientales no es recomendable realizar buceos (oscuridad, corrientes) a fin de proteger los buzos. Se utilizan equipos de seguridad de buceo como kit de oxígeno DAN y de primeros auxilios, boya de superficie para control del

personal en el bote, boya salchicha, computadores, pitos para dentro y fuera del agua, espejo, cuchillo, linterna y estrobo y GPS de emergencia en caso de pérdida y deriva. Los buzos descienden siempre con traje de neopreno completo de grosor adecuado según la temperatura reinante, guantes de caucho y capucha con el fin de protegerse del frío, de superficies abrasivas y del contacto con animales bentónicos urticantes (coral de fuego, gusanos de fuego, hidroides, entre otros) o presentes en el plancton como medusas y cintillas. El control de flotabilidad neutra debe ser el mejor posible para evitar braceo innecesario que pueda causar accidentes o daño a corales y se bucea siempre en parejas.

## **Materiales y métodos**

### *Montaje de estaciones*

Para poder evaluar los arrecifes coralinos se ha optado por montar estaciones permanentes de monitoreo que constan de 5 transectos lineales de 10 m cada uno y que se colocan a dos niveles: 3 a 7 m y 12 a 15 m de profundidad. Los transectos se definen con estacas de acero inoxidable clavadas sobre el fondo coralino sin dañar corales u otros organismos sésiles vivos (Figura 1 A). Para esto se sigue un protocolo riguroso bien documentado que exige tener una flotabilidad neutra constantemente tanto para fijar las estacas como para tender entre estas el cabo medrado con el cual se hace la lectura. Cada estaca se clava sobre sustrato inerte o sobre una porción de coral muerto, que no tenga espacios vacíos abajo y que sea lo suficientemente robusta para no romperse. Cada par de estacas de un transecto llevan una cuerda con nudos de acuerdo con el número asignado entre 1 y 5 al transecto (Figura 1B). Se realiza un diagrama de la distribución de los transectos en el fondo (Figura 1C) ilustrando su disposición. La dirección en que deben leerse siempre, su ubicación geográfica y alguna característica importante que permita su fácil ubicación en visitas posteriores. Los cabos deben templarse con firmeza para evitar que pendulen por las corrientes alterando los datos, pero sin dañar organismos vivos. El monitoreo se realiza en grupo, manteniendo contacto visual con los compañeros (Figura 1D). La información se toma flotando de forma controlada sobre el cabo para lo cual el manejo de flotabilidad neutra es imprescindible y requisito (Figura 1E). En cada punto marcado se debe observar perpendicularmente el componente del fondo presente justo debajo hasta tener 100 puntos y determinar el porcentaje correspondiente a cada organismo. Especialmente corales que deben identificarse a nivel de especie

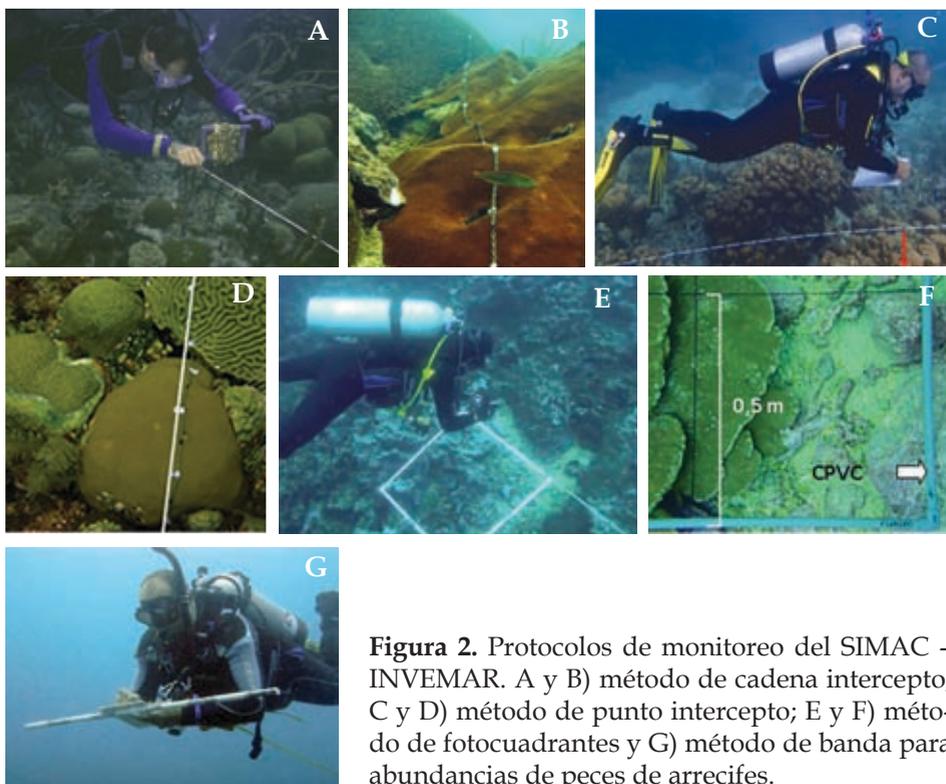
y algas que se toman de acuerdo al grupo constituyente (frondosas, tapete, calcáreas, incrustantes). El componente de peces arrecifales se determina mediante censos de las especies de 4 familias selectas (Lutjanidae, Serranidae, Acanthuridae y Labridae), registrados en bandas de 30 x 2 m, definidas por un flexómetro de 30 m y una vara de un metro marcada para permitir, además del ancho de la banda, determinar los rangos de tamaño de los peces A: 1 - 5 cm; B: 6 - 10 cm; C: 11 - 20 cm; D: 21 - 30 cm; E: 31 - 40 cm y F: >40 cm (Figura 1F).



**Figura 1.** Distintos momentos de la implementación de una estación de monitoreo de corales escleractineos someros, A) clavado de la estaca sobre el fondo marino. B) Estaca con los nudos de reconocimiento de cada transecto. C) vista de dos transectos tendidos sobre el fondo marino. D) Dos investigadores tomando los datos de dos transectos cercanos. E) investigador realizando la toma de datos de punto intercepto para cobertura de fondos y F) investigador realizando una banda para censos de peces.

## Protocolos de monitoreo SIMAC

A través de la historia del monitoreo de arrecifes de coral SIMAC se han empleado diversos protocolos entre los que se resaltan el método clásico que utiliza una cadena desplegada por el fondo entre las dos estacas, justo bajo el cabo guía y siguiendo fielmente la rugosidad del fondo (Garzón-Ferreira et al., 2002; Hill y Wilkinson, 2004) (Figura 2AB). Este método requiere mayor entrenamiento, cuidado y tiempo para la lectura de la información, pero el dato obtenido es más preciso. Adicionalmente, incluía protocolos para



**Figura 2.** Protocolos de monitoreo del SIMAC - INVEMAR. A y B) método de cadena intercepto; C y D) método de punto intercepto; E y F) método de fotocuadrantes y G) método de banda para abundancias de peces de arrecifes.

registrar la prevalencia de enfermedades y blanqueamiento para registrar la abundancia de erizos e invertebrados vágiles, gorgonaceos, peces de familias selectas y la riqueza de peces del arrecife. El segundo método utilizado ampliamente desde el año 2014 es el de punto intercepto (Hill y Wilkinson, 2004; Rodríguez-Rincón et al., 2014), donde solo se emplea el cabo guía. Marcado cada 10 cm y que tan solo requiere tener muy buena flotabilidad y leer justo en perpendicular bajo cada punto marcado el componente de fondo (Figura 2CD). Si bien no es tan dispendioso como la cadena, es menos preciso y más propenso al error en presencia de condiciones de corriente ya que la más leve inclinación al tomar la información cambia el dato. Finalmente, el método de usar fotocuadrantes (Hill y Wilkinson, 2004) (Figura 2EF), empleados únicamente en el SFF Malpelo, requieren un manejo aún mayor de la flotabilidad neutra y control de los movimientos en el agua, además de un software sencillo y eficiente para extraer la información de cada fotografía. Se trabaja con cuadrantes de  $1 \times 1$  m subdividido en 4 de  $50 \times 50$  cm de tal forma que al final de cada transecto se tengan 40 fotos y un total de 400 para el área prote-

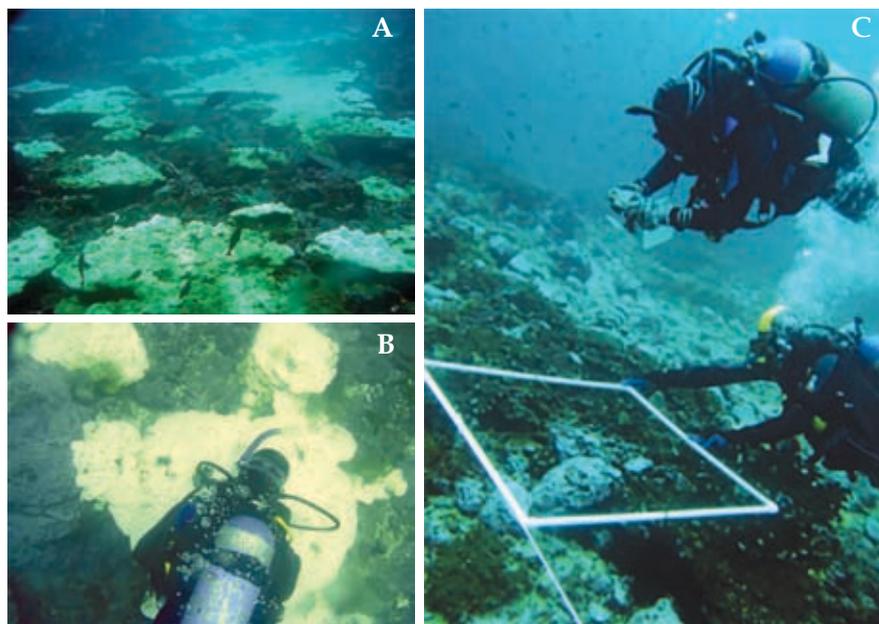
gida. Se utiliza el software de CPC´e para evaluar la cobertura de los fondos de Malpelo. Como valor agregado permite verificar en cualquier momento identificaciones correctas de especies o sacar información adicional de ese momento en particular. Y para la abundancia de peces de familias selectas, se continúa con las bandas de 30 x 2 m para Labridae, Lutjanidae, Acanthuridae y Serranidae (Figura 2G).

### Caso de estudio

*Blanqueamiento generalizado del coral duro Porites lobata en la isla Malpelo por anomalía térmica negativa en las aguas del santuario*

Desde el 2003 se vienen monitoreando las principales formaciones coralinas del Santuario de fauna y flora Malpelo (López-Victoria y Rozo, 2006; Navas-Camacho, 2018), en los dos sitios principales del área, El Arrecife y La Nevera (Zapata y Vargas-Angel, 2003), con estaciones establecidas entre los 10 y los 22 m de profundidad (Rodríguez-Ramírez et al., 2007; Navas-Camacho et al., 2022). En ambos sitios la especie más abundante y con tamaños que alcanzan los 3 m de diámetro y variedad de ecoformas es *Porites lobata* (Dana, 1846). Ampliamente distribuida a todo lo largo de la isla y desde unos pocos metros hasta más allá de 30 m la convierte en especie dominante y constructora de las formaciones coralinas. *P. lobata* es especialmente sensible a descensos de temperatura, se blanquea y puede morir con menos de 23 h después de exponerse a una temperatura de 15°C (Edmondson, 1928). De manera similar a lo sucedido en los corales con los incrementos de las temperaturas: las temperaturas bajas disminuyen la eficiencia fotosintética y causan la pérdida de zooxantelas, produciendo blanqueamiento y muerte de tejido (Brown, 1997; Coles y Fadlallah, 1991).

En abril de 2009 se registró un blanqueamiento específicamente en *P. lobata* (Figura 3AB). Incluso cuando algunas pocas colonias de *Gardineroseris planulata*, *Pocillopora eydouxi* y *P. capitata* también se blanquearon. El gran tamaño presentado por las colonias de *P. lobata* ( $\overline{XX} = 5.7 \pm 5.8 \text{ m}^2$ ), sumado a ser la especie más abundante con más de un 20 % de cobertura, produjo que la extensión del blanqueamiento fuera considerable en todo el arrecife. El porcentaje de blanqueamiento observado en colonias de *P. lobata* fue en promedio 66.3 % ( $\pm 28.6$ ) a 18 m y de 86.8 % ( $\pm 8.7$ ) a 20 m. Si bien no se realizaron mediciones por encima de 15 m, el blanqueamiento observado también fue alto (Zapata et al., 2013). Para el registro del blanqueamiento se utilizó el método de fotocuadrantes (Figura 3C). Resultados del monitoreo conducido en las fechas normales, junio - julio, mostraron que, en general, no se perdieron colonias debido al blanqueamiento de principios de año.



**Figura 3.** Blanqueamiento masivo observado en abril de 2009 en las colonias de *Porites lobata* del SFF Malpelo ocasionado por un descenso abrupto de la temperatura del agua (16°C).

## Recomendaciones

En esta época en que el deterioro ambiental del planeta amenaza cada día más la subsistencia de especies y ecosistemas enteros, se hace preponderante continuar realizando monitoreos de calidad de las aguas y de estado de los ecosistemas. Con el fin de poder dar voces de alerta sobre las condiciones cada vez menos alentadoras de nuestros ecosistemas estratégicos para actuar prontamente y mitigar lo más posible los efectos de la locura humana.

Por otra parte, es recomendable que los grupos de investigadores de cualesquier organismo, ecosistema o tema en particular ubicado en nuestros mares, sean cada vez más consciente de la responsabilidad que se tiene al entrar al agua y de la rigurosidad que se debe tener con la disciplina instruida por nuestros instructores. Para de esta manera evitar incidentes durante nuestro trabajo.

## **Bibliografía**

1. Burke, L., K. Reytar, M. Spalding and A. Perry. 2011. Reef at Risk revisited. Washington D. C.: World Resources Institute. The Nature Conservancy (TNC), the World Fish Center, the International Coral Reef Action Network (ICRAN), the United Nations Environment Programme - World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), and the Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN). Washington, D.C. 130 p.
2. Prah, H. von y H. Erhardt. 1985. Colombia: corales y arrecifes coralinos. FEN COLOMBIA, Bogotá, 295 p.
3. Díaz, J.M., L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Angel, F.A. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 5, Santa Marta. 176 p.
4. Reyes, J., N. Santodomingo y P. Flórez. 2010. Corales escleractineos de Colombia. Invemar, Serie de Publicaciones Especiales, No. 14. Santa Marta, 246 p.
5. Murray Roberts, J., A.J. Wheeler, A. Freiwald, S.D. Cairns. 2009. Cold-Water Corals. The Biology and Geology of Deep-Sea Coral Habitats. New York: Cambridge University Press.
6. Principe P., P. Bradley, S. Yee, W. Fisher, E. Johnson, P. Allen and D. Campbell. 2011. Quantifying Coral Reef Ecosystem Services. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC. 147 p.
7. Gil-Agudelo, D., R. Navas-Camacho, A. Rodríguez-Ramírez, M.C. Reyes-Nivia, S. Bejarano, J. Garzón-Ferreira y G.W. Smith. 2009. Enfermedades coralinas y su investigación en los arrecifes colombianos. Bol. Invest. Mar. Cost., 38(2): 189-224.
8. Navas-Camacho R., D.L. Gil-Agudelo, A. Rodríguez-Ramírez, M.C. Reyes-Nivia y J. Garzón-Ferreira. 2010a. Coral diseases and bleaching on Colombian Caribbean coral reefs. Rev. Biol. Trop. Vol. 58 (suplem 1): 95-106.
9. Navas-Camacho, R., Rodríguez-Ramírez, A., y Reyes-Nivia, M.C. 2010b. Agents of coral mortality on reef formations of the Colombian Pacific. Rev. Biol. Trop. Vol. 58 (Suppl. 1): 133-138.
10. Garzón-Ferreira, J., M.C. Reyes-Nivia y A. Rodríguez-Ramírez. 2002a. Manual de Métodos del SIMAC. INVEMAR, Santa Marta, 112p.
11. Hill, J. y C. Wilkinson. 2004. Methods for ecological monitoring of coral reefs: a resource for managers. Australian Institute of Marine Science. 117 pp.
12. Rodríguez-Rincón, A., S. Navarrete-Ramírez, D. Gómez-López y R. Navas-Camacho. 2014. Protocolo Indicador Condición Tendencia Áreas Coralinas (ICTAC). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Serie de Publicaciones Generales del Invemar, 66. Santa Marta. 52 p.

13. López-Victoria, M y D. Rozo. 2006. Model-based geomorphology of Malpelo Island and spatial distribution of breeding seabirds. Bol. Investig. Mar. Costeras, 35: 111-131.
14. Navas-Camacho, R., 2018. Capítulo III. Formaciones coralinas. En: Malpelo es Colombia: maravilla estratégica. Secretaría Ejecutiva Comisión Colombiana del Océano. Bogotá D.C., pp. 180.
15. Edmondson, C.H. 1928. The ecology of an Hawaiian coral reef. Bull. Bernice P. Bishop Mus, 45: 1-64.
16. Zapata F.A. and B. Vargas-Ángel. 2003. Corals and coral reefs of the Pacific coast of Colombia. 419-447. En: Cortés, J. (Ed.). Latin American Coral Reefs. Elsevier Science, Amsterdam, Países Bajos. 508 p.
17. Rodríguez-Ramírez, A., R. Navas-Camacho, M.C. Reyes-Nivia, S. Bejarano-Chavarro y J. Garzón-Ferreira. 2007. Implementación del SIMAC en la isla de Malpelo. En: DIMAR-CCCP y UAESPNN-DTSO. Santuario de Fauna y Flora Malpelo: descubrimiento en marcha, DIMAR, Bogotá. 97-112 pp.
18. Navas-Camacho R., A. Acosta-Chaparro, L. Sanchez-Valencia y J. Vega-Sequeda. 2022. Informe final monitoreo arrecifes coralinos Santuario de Fauna y Flora Malpelo. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. 26p.
19. Brown, B.E. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. Coral Reefs, 16 Suppl.: S129-S138.
20. Coles, S.L. y Y.H. Fadlallah. 1991. Reef coral survival and mortality at low temperatures in the Arabian Gulf: new species-specific lower temperature limits. Coral Reefs, 9: 231-237.
21. F.A. Zapata, J. Jaramillo-González y R. Navas-Camacho. 2013. Extensive bleaching of the coral *Porites lobata* at Malpelo island, Colombia, during a cold water episode in 2009. Bol. Invest. Mar. Cost., 40 (Supl. Esp.): 185-193



## Introducción a la arqueología subacuática; metodologías de búsqueda, registro, documentación y difusión del patrimonio cultural sumergido<sup>1</sup>

Eduardo Roa Brynildsen\*

La Arqueología ya sea en tierra o bajo las aguas tiene el propósito de estudiar a los seres humanos y su sociedad. La arqueología se diferencia de otras ciencias sociales por la fuente de estudio utilizada<sup>2</sup>. Para un arqueólogo los restos materiales son los de mayor importancia y valor para reconstruir el pasado.

*“La Arqueología subacuática no es una actividad autónoma ni una disciplina arqueológica, sino una técnica particular al servicio de la arqueología; técnica que permite a la arqueología extender su campo de investigación al rico mundo subacuático”<sup>3</sup>.*

La Arqueología subacuática es relativamente nueva y tomó fuerza con la aparición del buceo autónomo, desarrollado por los franceses J. Y. Cousteau y E. Gagnan en 1943 y patentado comercialmente en 1946 bajo el nombre de *Aqua Lung*. El buceo autónomo abriría un mundo de posibilidades bajo el agua<sup>4</sup>. Fue entonces cuando los primeros buzos empezaron a utilizar los primitivos modelos comerciales de equipos, con dos y tres botellas de aire comprimido a la espalda y provistas de un regulador de presión para suministrar aire al “hombre rana”, como se les conocía familiarmente<sup>5</sup>.

1 Este artículo es una nueva publicación del capítulo La Arqueología Subacuática del libro “Arqueología marítima del legendario Puerto de Cobija”, 2014. Proyecto Fondart Regional 10043. Consejo de la Cultura y las Artes. Gobierno de Chile. Autorizado por el autor, Eduardo Roa Brynildsen.

\* MARIS Södertörns University, Stockholm, Sweden

2 Adams & Rönnby, 1996: 10.

3 Gianfrotta y Pomey, 1981: 8.

4 Ivars, et.al., 1987: 28.

5 Ivars, et. al., 1987: 30.

En la actualidad, la arqueología subacuática se ocupa de la investigación de los restos sumergidos del pasado, por ejemplo, estructuras terrestres sumergidas, naufragios, objetos materiales aislados, arrojados o perdidos en el fondo, obras portuarias, depósitos rituales en pozos sagrados como los cenotes, zonas de fondeo, astilleros y otros tantos que constituyen la base principal de estudio<sup>6</sup>. Su método es el mismo que rige en cualquier trabajo arqueológico y sigue los mismos principios, con la diferencia de que se realiza bajo el agua.

Sin embargo, muchas veces estos restos arqueológicos son estudiados como parte de un todo que incluye también aquellos encontrados en litorales costeros o zonas intermareales, sin necesidad de encontrarse sumergidos, por ejemplo, sitios prehispánicos costeros, denominados conchales o concheros, varaderos de canoas, así como también restos de muelles y antiguos puertos<sup>7</sup>. Este enfoque de investigación se denomina Arqueología marítima.



**Figura 1.** Registro y medición de piezas de artillería en el bajo Salmedina por grupo de Arqueología subacuática, Universidad del Norte. Crédito: Fritz Hanselmann / University of Miami.

Una investigación arqueológica subacuática se compone de fases sucesivas de trabajo. Estas incluyen desde la recopilación de antecedentes escritos, hasta la aplicación de tratamientos de conservación a los objetos recuperados

6 Martin Bueno, et. al., 2003: 28.

7 Álvarez, 2004: 1151–1157.

y el uso de los resultados para trabajos educativos. En cualquier proyecto de arqueología subacuática, resulta imprescindible recopilar toda la información sobre la zona de estudio antes de sumergirse. De esta manera, la primera fase es de documentación y estudio de fuentes de información, como son la cartografía o los textos escritos<sup>8</sup>.

Si bien en tierra los arqueólogos pueden registrar restos arqueológicos a pie, encontrando, por ejemplo, cementerios o asentamientos prehistóricos, la posibilidad que un arqueólogo subacuático pueda hacer lo mismo es limitada. Ciertamente, las inspecciones de buceo se realizan en áreas más acotadas, con una visibilidad limitada y en condiciones de trabajo más complicadas, factores que hacen apropiado contar con la ayuda de medios técnicos auxiliares. De todas maneras, ciertas variables como la profundidad y las corrientes inevitablemente afectan el tipo y modo de búsqueda bajo el agua (prospección subacuática).

La prospección geofísica mediante equipos de detección acústicos y magnéticos, como el sonar de barrido lateral (SBL), perfilador de fondo, multihaz y magnetómetro, permite rastrear el fondo sin necesidad de sumergirse. Usando modernos sistemas de radionavegación y posicionamiento, totalmente automatizados, se procesa la información a través de distintos programas informáticos. Esta segunda fase permite observar “anomalías” en el fondo, lo que sugiere lugares donde realizar inmersiones de buceo, las que a su vez posibilita una observación directa del fondo.

En estas prospecciones con instrumentos de percepción remota se utilizan frecuentemente ecosondas y sonares de barrido lateral. Con las primeras se conoce la profundidad exacta del fondo y se localizan objetos relativamente grandes. El sonar de barrido lateral es un instrumento acústico y funciona registrando “ecos” de objetos y formaciones sobre el fondo. Este instrumento se usa generalmente en búsquedas sobre amplias áreas del fondo<sup>9</sup>. La diferencia entre ambos radica en que el sonar escanea una franja del fondo en lugar de sólo medir la profundidad. Esta diferencia es útil para localizar un naufragio en un fondo razonablemente plano<sup>10</sup>.

Un experimentado operador de sonar no sólo puede descubrir naufragios, sino que también otras estructuras sueltas en el fondo. Sin embargo, existen

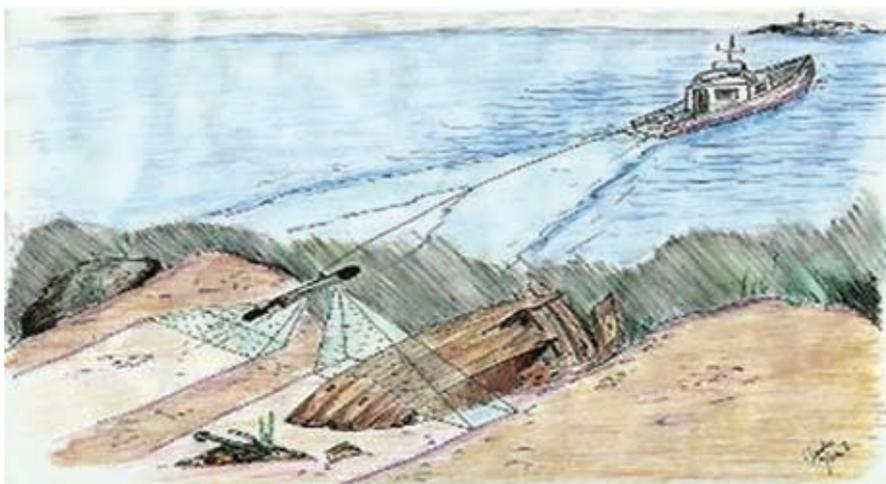
---

8 Green, 2004: 14.

9 Green, 2004: 77.

10 Bowens, 2009: 107.

ciertas limitaciones en el propio contexto arqueológico<sup>11</sup>, por ejemplo, en el caso de objetos o artefactos pequeños que no sobresalen mucho, los que resultan básicamente imposibles detectar con sonar. Otras limitaciones tienen que ver con el tipo de fondo, por ejemplo, si el fondo es rocoso se corre el riesgo de perder incluso grandes objetos al caer en la “sombra del sonido”<sup>12</sup>.



**Figura 2.** Ilustración de prospección geofísica mediante Sonar de Barrido Lateral remolcado por una embarcación sobre un naufragio. Crédito: Claudio Silva.

Por lo tanto, normalmente es necesario complementar la prospección geofísica de sonar con inspecciones de buceo, orientadas a la observación directa de las anomalías u objetivos individualizados. Hay varias formas de prospectar con buzos; círculos concéntricos en torno a un punto de referencia, ubicado en el centro aproximado del área a revisar, buceando en círculos con un radio cada vez mayor<sup>13</sup>, así como la denominada “prospección en calles”, sobre la base de un rectángulo marcado con cuatro boyas, subdividido en líneas paralelas o corredores de búsqueda<sup>14</sup>. Generalmente, la coordenada de un punto en el fondo puede ser obtenida a partir de una boya, un cabo y un peso que se mantendrá en el fondo<sup>15</sup>.

11 Rönnby, et.al. 2003: 18.

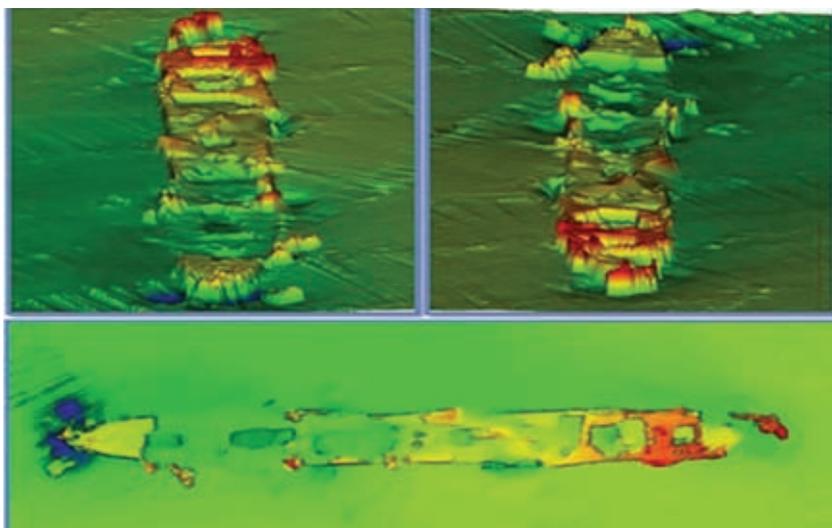
12 Bowens, 2009: 108.

13 Green, 2004: 55.

14 Green, 2004: 51–53.

15 Bowens, 2009: 101.

Para el arqueólogo, es obviamente deseable poder visitar el lugar y los artefactos que se van a estudiar. Sin embargo, cuando se debe trabajar a mayores profundidades o durante largo tiempo, se puede utilizar un robot sumergible equipado con video cámara, a menudo llamado ROV (Remote Operated Vehicle, por sus siglas en inglés)<sup>16</sup>. El Sonar de barrido lateral y el ROV pueden evidenciar los objetos que sobresalen en el fondo oceánico o lacustre, por el contrario, detectar los restos arqueológicos bajo el fondo resulta muy complejo. Sin embargo, existen casos favorables donde una ecosonda de baja frecuencia o “perfilador” puede registrar diferencias en la densidad del fondo<sup>17</sup>, lo que podría relacionarse con la existencia de algún tipo de vestigio arqueológico de mayor tamaño bajo los sedimentos. Por su parte, el magnetómetro detecta las variaciones del campo magnético, por lo que puede detectar la existencia de un metal ferroso sumergido<sup>18</sup>.



**Figura 3.** Levantamiento arqueológico con multihaz sobre el Vapor Prinz August Wilhem hundido en 1918 en Puerto Colombia, Colombia. Crédito: Universidad del Norte.

Una vez que los restos arqueológicos sumergidos son encontrados, los arqueólogos subacuáticos proceden a documentar, de manera preferiblemente no intrusiva, sus características mediante mediciones, fotografías (fotogrametría),

16 Green, 2004: 58.

17 Bowens, 2009: 109.

18 Bowens, 2009: 111.

video grabaciones y dibujo planimétrico, entre otras cosas. En una fase posterior de la investigación, con una metodología de trabajo autorizada por la autoridad competente en el respectivo país, los especialistas desarrollarán una excavación arqueológica. Al igual que como se realiza en tierra, el arqueólogo subacuático puede excavar en cuadrículas, es decir, áreas cuadradas dispuestas en el fondo. La metodología arqueológica de excavación da especial importancia a la ubicación de los objetos y sus relaciones espaciales, así como al descubrimiento sistemático de las capas de sedimento en las que los restos fueron depositados.

La excavación arqueológica supone normalmente la remoción ordenada del sedimento para descubrir los restos ocultos, registrando durante el proceso cada detalle de los objetos y estructuras que van apareciendo. En consecuencia, la excavación corresponde a la fase de trabajo donde se registra la mayor cantidad posible de información del sitio arqueológico<sup>19</sup>, de tal manera que una vez concluida, se pueda recrear cuantas veces sea necesario, con la finalidad de interpretar correctamente el hecho histórico que ha dado lugar a su formación.



**Figura 4.** Tareas de excavación arqueológica subacuática en el puerto de Valparaiso, Chile. Las técnicas de arqueología empleadas bajo el agua incluyen la aspiración y remoción de los sedimentos del fondo marino, la documentación exhaustiva, levantamiento cuidadoso, rotulado y embalaje de cada artefacto a ser recuperado. Crédito: David Letelier/ARKA.

<sup>19</sup> Bowens, 2009: 141.

En las excavaciones es conveniente retirar las capas de sedimento a mano o por medio de una plana, mientras que para mantener la visibilidad en el agua y poder transportar el sedimento, se requiere alguna forma de draga de succión<sup>20</sup>. Esto sólo funcionará como la “carretilla” o balde que un arqueólogo en superficie utiliza para mover la tierra. La draga o manga de succión está basada en un sencillo principio físico. Al introducir en el agua un flujo de corriente, aire o agua canalizada mediante una manguera, se produce el efecto Venturi<sup>21</sup>. Su uso correcto debe ser como instrumento de transporte y nunca de excavación, es decir, que sólo ha de utilizarse para retirar los depósitos sin valor arqueológico.

Un requisito previo para el arqueólogo subacuático es ser capaz de trabajar de manera efectiva y también ser capaz de permanecer de manera que no altere el fondo, nublando la visibilidad en el agua. Un marco de andamiaje o cuadrícula metálica sobre el área de excavación es una gran solución<sup>22</sup>. Sin embargo, otros factores también relacionados al buceo afectan el trabajo de excavación arqueológica bajo el agua, por ejemplo, el enfriamiento de los buzos y los tiempos de buceo limitados, con los que se controlan los riesgos asociados a la presión y el nitrógeno.

Los principios básicos de una excavación para documentar la estratigrafía arqueológica es el mismo en tierra o agua. Una capa directamente depositada sobre otra es comúnmente más reciente. En términos generales, las capas de sedimento depositadas en niveles inferiores resultan más antiguas, conteniendo en consecuencia generalmente objetos más antiguos, mientras que aquellas de niveles superiores resultan más recientes. Al observar el orden en el que las diferentes capas se superponen se pueden organizar cronológicamente los acontecimientos pasados<sup>23</sup>.

Especialmente en un fondo blando, las cosas pesadas se hunden rápidamente bajo el sedimento, de modo que objetos de diferentes épocas podrían ser encontrados en un mismo nivel. Sin embargo, el objeto pesado al caer y acomodarse en el fondo dejará una huella<sup>24</sup>, el “socavón” creado se llenará nuevamente de sedimentos más recientes, dejando un claro patrón de estratificación. Por tanto, en una excavación arqueológica no sólo las “capas normales” proporcionarán información, también los socavones y otros patrones

---

20 Rönnby, et. al. 2003: 19.

21 Bowens, 2009: 144

22 Green , 2004: 238.

23 Bowens, 2009: 58 & Green, 2004: 244.

24 Rönnby, et. al. 2003: 19.

observados en los sedimentos conformarán importantes “contextos arqueológicos”. Éstos proporcionan la oportunidad de reconstruir acontecimientos y procesos en determinado sitio<sup>25</sup>. Todas estas relaciones entre objetos y sedimentos se pierden para siempre cuando un sitio subacuático, por ejemplo, un naufragio es expoliado.

El registro gráfico de una excavación tiene varias facetas relacionadas: dibujo, fotografía y filmación. Bajo el agua es posible dibujar con toda precisión los restos arqueológicos, exactamente igual que en una excavación terrestre<sup>26</sup>. El arqueólogo deberá interpretar los sedimentos y sus relaciones: ¿dónde están los límites de las diferentes capas?, ¿qué capa indica actividad humana? y ¿cuál es la capa natural de sedimentación? Nuevas técnicas de registro como la fotogrametría han tenido muy buenos resultados para llevar a cabo una documentación rápida y exacta para sitios o artefactos arqueológicos. Esta técnica permite la reconstrucción de modelos en 3D que se pueden escalar, posicionar con exactitud en el espacio geográfico y permiten documentar y monitorear *in situ* sitios sin excavarlos.

Un tipo importante de pecio, a menudo excavado por arqueólogos subacuáticos, corresponde a restos de embarcaciones que naufragaron. Un naufragio es a menudo considerado una “capsula de tiempo”, ya que es un dramático momento congelado de la historia<sup>27</sup>. La excavación de un naufragio conlleva requisitos específicos, ya que estos restos arqueológicos son a menudo muy complejos. Las diferentes fases de decaimiento de las estructuras del naufragio pueden provocar cambios en los sedimentos relacionados con el sitio. Esta información puede ser importante en la comprensión del aspecto original de la nave, mientras que el conocimiento de la estratificación en un naufragio permite reconstruir el proceso de formación de sitio<sup>28</sup>.

El naufragio puede presentar una deposición ordenada, conformando una especie de estratigrafía a lo largo del tiempo o ser producto de una cuestión de segundos<sup>29</sup>. Un análisis de esta estratigrafía puede proporcionar información sobre el curso del hundimiento, la construcción original del barco y cómo estaba equipado a bordo<sup>30</sup>.

---

25 Rönby, et. al. 2003: 20.

26 Leon Amores, et.al. 2003: 120

27 Cederlund, 1999: 62.

28 Rönby, et. al. 2003: 21.

29 Muckelroy, 1980: 26.

30 Muckelroy, 1980: 27.



**Figura 5.** En el puerto de Dalarö, cerca de Estocolmo, se encuentra el naufragio del barco filibote Anna Maria a 21 metros de profundidad. Una Filibote (en Holandés Fluit) era un tipo de barco mercante holandés que podía llevar una carga pesada. Durante el invierno de 1708-1709, Anna Maria quedó atrapada en el hielo en Dalarö. Una noche encendieron fuego en la cocina, y se olvidaron. La mayor parte de la popa del barco se quemó hasta la línea de flotación, el barco hizo agua y se hundió a través del hielo. Un registro mediante fotogrametría se realizó por parte del Museo Marítimo Nacional de Suecia en el 2010, y muestra que aún queda mucho de su casco de 38 metros de eslora y 8 metros de manga y de su carga que consiste principalmente en tablonces de pino. Crédito: SMTM.

Para la investigación arqueológica subacuática es necesario tener ciertas habilidades de buceo, así como una serie de ayudas técnicas. La documentación, excavación y evaluación del material a conservar es solo el comienzo. Cuando se debe tratar de interpretar y entender lo que los naufragios, asentamientos sumergidos y estructuras hundidas nos dicen, es cuando realmente comienza lo emocionante de la arqueología.

### ¿Qué se conserva?

Una pregunta crítica para el arqueólogo es el grado de representatividad que tiene el material preservado en el sitio donde realiza sus excavaciones: ¿cuánto ha sido destruido con el paso del tiempo?, ¿cómo era el medio ambiente en el cual se depositó? Acá existe una importante diferencia entre la arqueología terrestre y la subacuática, ya que una de las mayores ventajas de la segunda es la mejor conservación del material orgánico bajo el agua<sup>31</sup>. Por ejemplo,

31 Rönby, et.al., 2003: 10.

en los sedimentos del fondo, se pueden hallar restos de comida, aserrín de madera trabajada y prendas de vestir. La buena preservación del material orgánico en el agua proporciona una oportunidad única para estudiar gran parte del material que muchas veces se pierde en tierra.

Por ejemplo, en excavaciones desarrolladas en Loch Tay (Escocia), un asentamiento sumergido de la Edad de Bronce, se descubrieron cerezas y barriles con mantequilla con más de 2500 años de antigüedad<sup>32</sup>. Un ejemplo aún más antiguo de restos perfectamente conservados bajo el agua corresponde a restos humanos prehistóricos hallados en los agujeros azules de Florida. Los buzos que llegaron en la década de 1950 a estas cuevas sumergidas se encontraron con cráneos en los cuales varias partes del cerebro estaban conservadas<sup>33</sup>. En Suecia se encuentra el Museo Vasa que alberga, el barco mejor conservado del mundo del siglo XVII. Vasa se hundió en su viaje inaugural en Estocolmo en 1628. Después de 333 años en el fondo del mar, fue rescatado en 1961 y se exhibe el 98% de la estructura original con más de 300 esculturas y ornamentos. Las exposiciones cuentan sobre arquitectura naval, la vida a bordo, historia y navegación de la época.



**Figura 6.** Vista a la izquierda de cómo el Vasa rompe la superficie del agua después de 333 años bajo el mar báltico con la ayuda de los pontones de rescate Oden y Frigg en 1961. La conservación comenzó después de la excavación. El barco fue rociado e impregnado con polietilenglicol (PEG) durante 17 años. Desde 1990, el barco ha estado en exhibición en el Museo Vasa. Crédito: Museo Vasa.

El frío, la oscuridad y bajos niveles de oxígeno en el agua son factores que reducen la biodegradación y contribuyen a la conservación. El agua no produce deshidratación del material en el contexto de una sedimentación geológica

32 Muckelroy, 1978: 156.

33 Rönnby, et.al. 2003: 13.

que encapsula y protege los objetos. Por otra parte, los restos subacuáticos tienden a presentar menos probabilidades de daños causados por el hombre en comparación con los restos terrestres.

En términos generales, la buena preservación bajo el agua permite que las condiciones para estudios estratigráficos sean muy buenas. Sin embargo, bajo el agua también hay degradación de los restos arqueológicos<sup>34</sup>. Por ejemplo, la broma (*Teredo navalis*) es un gusano que perfora la madera, existiendo además otros organismos que destruyen y degradan los materiales orgánicos<sup>35</sup>. La protección geológica de sedimentos no siempre se produce, ni es incluso estable en el tiempo en un solo lugar. Corrientes marinas y condiciones del viento también pueden tener efectos significativos en el fondo del mar.

Una nueva frontera que se debe afrontar está representada por la posibilidad de efectuar intervenciones de restauración y conservación directamente en el agua. Junto a la protección de los agentes externos (dragados, excavaciones y fondeo de naves) se puede establecer un programa experimental de intervenciones de conservación que persigan la conservación y restauración *in situ*<sup>36</sup>.

## Bibliografía

1. Adams, J. y J. Rönby. 1996. *The Prince's Ship*. Almqvist & Wiksell. AWT Uppsala.
2. Álvarez, R. 2004. *Conchales arqueológicos y comunidades locales de Chiloé a través de una experiencia de educación patrimonial*. Chungará V.36,1151-1157. Arica.
3. Bass, F. 1975. *Archaeology Beneath the Sea*. New York: Walker.
4. Bowens, A. 2009. *Archaeology Underwater, The NAS Guide to Principles and Practice*. NAS II Edition. Oxford.
5. Carol V. Ruppe y Janet F. Barstad. *International handbook of underwater archaeology*. Springer Science+Business Media New York. 2002.
6. Gianfrotta, P. y P. Pomey.1981. *Archeologia subacquea: storia, tecniche, scorpere e relitti*. Mondadorim Milán.
7. Cederlund, C. 1999. *Nordic Underwater Archaeology*, 62-67. Stockholm. Ferrari, B. y J. Adams. 1990. *Biogenic modifications of marine sediments and their influence on archaeological material*. *International Journal of Nautical Archaeology*. 19:2 s.139-151

---

34 Ferrari, B. Adams, J. 1990: 139-151

35 Bowens, 2009: 32.

36 Rönby et. al. 2003:21.

8. Green, J. *Maritime Archaeology: A technical Handbook*. 2004.
9. Ivars, J. y T. Rodríguez. 1987. *Historia del buceo. Su desarrollo en España*. Ediciones Mediterráneo.
10. León Amores, C. 2003. *Metodología de la Arqueología Subacuática*. En Monte Buciero 9. *La conservación del material arqueológico subacuático*. Ayuntamiento de Santoña. Imprenta de J. Martínez. España.
11. Martín Bueno, M. 2003. *Patrimonio cultural sumergido: Investigar y Conservar para el futuro*. 21-62. Ayuntamiento de Santoña.
12. Muckelroy, K. 1978. *Maritime Archaeology*. Cambridge.
13. Muckelroy, K. 1980. *Archaeology Under Water*. An Atlas of the World's Submerged Sites. 122-131. Hong Kong.
14. Rönnby, J. 2003. *Treasures of the Baltic Sea*. Swedish Maritime Museum 11-23.

## La fotogrametría digital submarina como herramienta para la cuantificación de formas y el monitoreo de sistemas arrecifales

---

Diego García Medrano\*  
 Eduardo Ramírez Chavez\*\*  
 Luis José Ortiz Martínez\*\*\*  
 Sergio Guendulain García\*\*\*\*  
 Andrés López Pérez\*\*\*\*\*

---

### Introducción

La complejidad de la estructura física tridimensional (3D) de los arrecifes de coral brinda numerosos y variados hábitats, sustentando una alta riqueza y abundancia de formas de vida al mejorar la disponibilidad de sitios de refugio, reproducción y alimentación para la fauna asociada<sup>1,2,3</sup>. Los corales con morfologías arquitectónicamente complejas como los géneros *Pocillopora* y *Acropora*, contribuyen en mayor medida al mantenimiento de un alto número de individuos y especies en relación con corales arquitectónicamente menos complejos<sup>4,5,6</sup>. Debido a las crecientes amenazas a los arrecifes de coral como el cambio climático, las actividades antropogénicas e impactos hidrometeo-

---

\* Instituto de Ecología, Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Puerto Ángel, Oaxaca, México

\*\* Instituto de Ecología, Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Puerto Ángel, Oaxaca, México

\*\*\* Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Puerto Ángel, Oaxaca, México

\*\*\*\* Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México

\*\*\*\*\* Laboratorio de Ecosistemas Costeros/Laboratorio de Arrecifes y Biodiversidad (ARBIOLAB). Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma, 1<sup>a</sup>. Sección. Alcaldía Iztapalapa CP 09310, Ciudad de México

rológicos, el estudio de la complejidad de la estructura física 3D de los arrecifes ha pasado a primer plano<sup>7,8</sup>.

Dado que un efecto crítico de la degradación de los arrecifes de coral es la pérdida de su estructura física tridimensional, la adopción de tecnologías basadas en herramientas fotogramétricas representan oportunidades no invasivas que permiten medir y evaluar de manera integral los cambios en el tamaño y la estructura física 3D de los arrecifes de coral a lo largo del tiempo. Además de identificar características que juegan un papel importante en la facilitación del hábitat para las especies marinas y el mantenimiento de los bienes y servicios ecosistémicos<sup>9</sup>.

Las reconstrucciones 3D obtenidas mediante fotogrametría digital submarina pueden proporcionar métricas robustas de crecimiento, cobertura de coral y variables de complejidad del hábitat<sup>10</sup>. Además, permiten monitorear signos de blanqueamiento, erosión, lesiones o enfermedades específicas desde escalas espaciales pequeñas (i.e., colonias) hasta paisajes arrecifales<sup>9,11,12</sup>. La implementación de métodos que de manera expedita permitan cuantificar los efectos de las continuas perturbaciones en la estructura y función de los hábitats de coral, permiten el desarrollo e implementación de planes de manejo con bases biológicas sólidas.

## **Objetivos**

En este capítulo se describen técnicas fotogramétricas simples, accesibles y robustas empleadas en la generación de modelos tridimensionales para la cuantificación de la forma de colonias de corales y sistemas arrecifales.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Debido a la relativa distribución somera de las comunidades coralinas, los procedimientos de buceo empleados en la captura de imágenes para la reconstrucción 3D submarina representan un riesgo bajo. Sin embargo, es necesaria la implementación de medidas de seguridad durante esta actividad. Las medidas contemplan el monitoreo de las condiciones climáticas que pudieran interferir en la seguridad del grupo de trabajo y en la obtención de datos, debido a que para lograr mejores resultados, se deben evitar condiciones de turbidez, fuerte oleaje y corriente. La captura de imágenes submarinas debe realizarse por dos buzos avanzados con buen manejo de la orientación y la flotabilidad, debido a los patrones de desplazamiento propios de la técnica de captura. Finalmente, se deben seguir los procedimientos estándar de se-

guridad de buceo y contar con el equipo de seguridad necesario tales como boyas de superficie y silbatos. En la embarcación es recomendable contar con un botiquín de primeros auxilios, equipo de oxígeno, así como contar con un buen sistema de comunicación y con un plan de contingencias.

## **Materiales y métodos**

### *Monitoreo fotogramétrico*

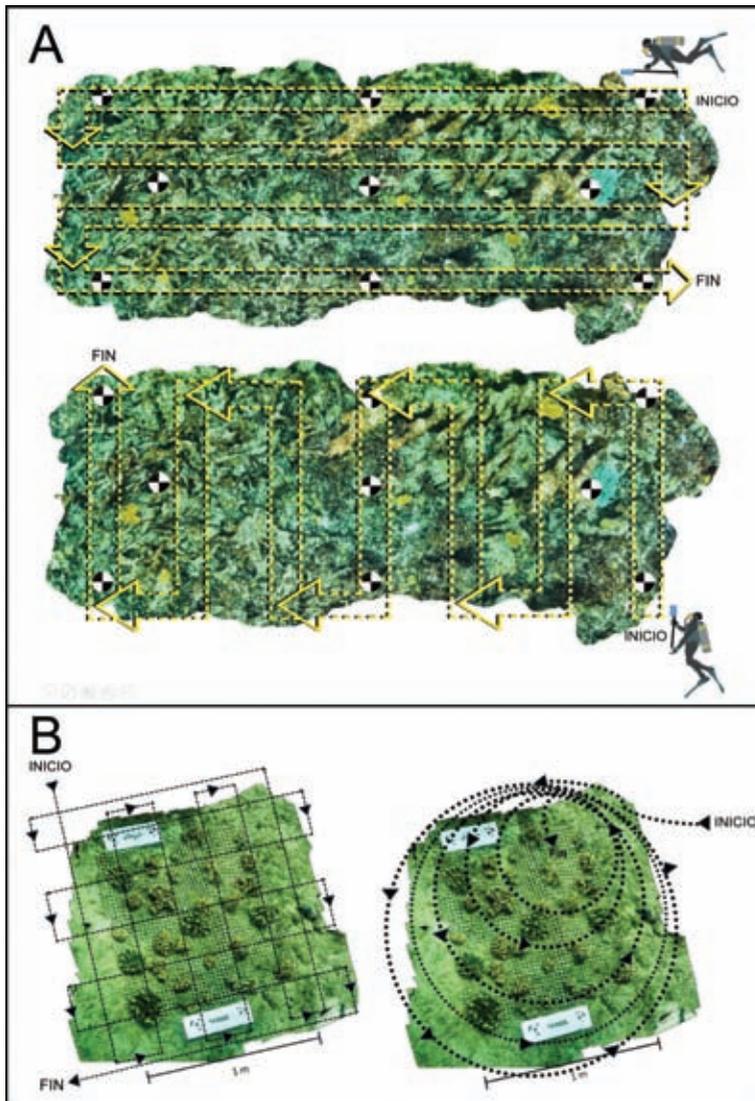
Para la caracterización de parches arrecifales se emplean transectos de banda. El largo y ancho del transecto dependen de las necesidades particulares y el enfoque de cada estudio. A la fecha, el grupo de trabajo ha realizado transectos de banda de 25 x 4 metros en el Pacífico mexicano y transectos de 10 x 2 metros en el Caribe mexicano. El transecto se filma mediante una cámara deportiva GoPro, siguiendo un patrón de cortadora de césped<sup>13</sup> (Figura 1A).

Por su parte, para la caracterización de unidades de muestreo con dimensiones inferiores, como colonias individuales (dependiendo de la morfología) o cuadrantes de 1 m x 1 m, se implementa el barrido en patrón de cortadora de césped, en combinación con un barrido en corte tipo monumento, el cual consiste en la captura de video siguiendo un patrón de espiral sobre el objeto de interés (Figura 1B). La combinación de estos barridos disminuye la pérdida de información en los costados de los objetos a modelar.

El área de interés debe ser video filmada a una distancia de ~ 2 m entre el sustrato y el sensor óptico, mientras que, para los cuadrantes y las colonias individuales, los videos son tomados a una distancia de ~ 50 y ~ 30 centímetros respectivamente. No obstante, esta distancia varía dependiendo de las condiciones de la columna de agua tales como el grado de visibilidad, así como del objetivo del proyecto en el que se emplee la técnica. La duración del video dependerá del objeto a modelar. Sin embargo, a manera de referencia, pueden tomar ~ 15 minutos realizar transectos de banda de 25 x 4 metros, ~ 8 minutos para transectos de banda de 10 x 2 metros, ~4 minutos para cuadrantes de 1 x 1 metro y ~ 1.5 minutos para colonias individuales de 50 centímetros de diámetro máximo.

Previo a la obtención de los videos, dentro de cada transecto a modelar o alrededor del objeto de interés (colonia de coral o cuadrante), se distribuyen reglillas de calibración con una dimensión conocida (Figura 1). Adicionalmente, con la finalidad de tener referencias métricas de cada transecto y cada cuadrante, estos se georreferencian mediante un GPS. Esta actividad puede ser realizada desde superficie colocando boyas de buceo.

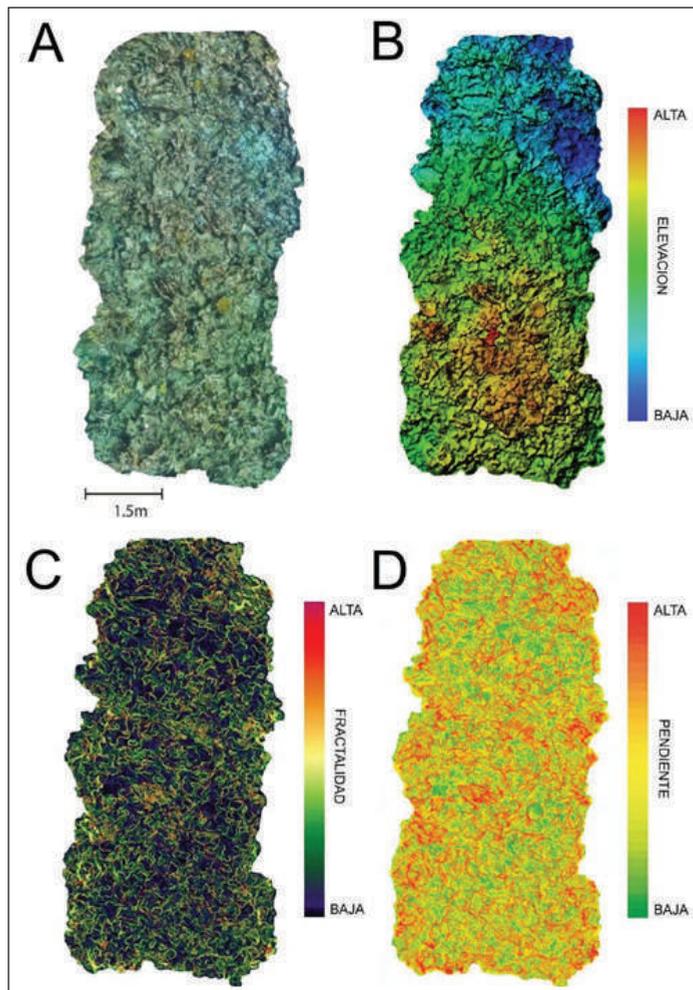
Para facilitar la toma de videos de los transectos, es recomendable el empleo de dos buzos y una persona de apoyo en superficie. Mientras un buzo coloca el transecto y las marcas de referencia, y el segundo realiza la captura del video, la persona en superficie georreferencia el transecto mediante un GPS.



**Figura 1.** Tipos de barridos empleados para la reconstrucción de modelos 3D. A) barrido tipo cortadora de césped. B) combinación entre el barrido en corte de césped y el barrido en tipo monumento. Observen la colocación y distribución de las reglillas de calibración.

### Generación de modelos 3D

A partir de los vídeos obtenidos se generan una serie de fotogramas. Estas imágenes son posteriormente procesadas mediante la técnica fotogramétrica “Structure from Motion” (SfM)<sup>14</sup> para la generación de los modelos 3D. Para el procesamiento de reconstrucciones 3D de transectos y cuadrantes, se sugiere que las imágenes sean representadas de manera espacial empleando un software fotogramétrico y de análisis espacial.



**Figura 2.** Productos fotogramétricos obtenidos a partir de un barrido en patrón de cortadora de césped en un sitio de restauración arrecifal en Xcalak, Caribe mexicano. A) ortomosaico. B) modelo digital de elevaciones (MDE). C) mapa de dimensión fractal. D) mapa de pendiente.

Los modelos deben ser construidos en un software con capacidad de representar, por medio de reconstrucción fotogramétrica, los objetos capturados en video de acuerdo con lo reportado por Burns et al. (2015). A partir de los videos obtenidos se generan los fotogramas y se prosigue con el proceso fotogramétrico estándar: (1) limpieza/calidad de las fotos, (2) alineación de fotogramas, (3) construcción de nube de puntos densa, (4) construcción de malla, (5) construcción de textura, (6) construcción de ortomosaico (Figura 2A) y (7) construcción de modelo digital de elevaciones (DEM) (Figura 2B).

Se recomienda que todos los procesos se establezcan en calidad alta a partir de la configuración predeterminada. Los recuentos máximos de las mallas se deberán establecer en 4,000,000 (para aumentar la resolución de escala fina de los modelos). En la actualidad los softwares para fotogrametría realizan la calibración de la cámara automáticamente utilizando el modelo de distorsión de Brown con información focal supuesta. La alineación de fotos genera puntos de enlace entre las fotos, que los alinean sobre el objeto a modelar y estiman la posición de la cámara para todas las fotos. La construcción de la nube densa de puntos se triangula a partir de los puntos de enlace para identificar y ubicar en el espacio píxeles únicos que se encuentran en fotos superpuestas. La malla o modelo interpola áreas de superficie alrededor de los puntos generados en la nube densa de puntos. El texturizado superpone el color de los píxeles de las fotos originales en la malla de acuerdo con la alineación original de las cámaras. El ortomosaico es una representación proyectada ortogonal y en dos dimensiones del terreno en forma de foto, mientras que el modelo digital de elevaciones permite caracterizar y medir las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Finalmente, la malla, así como el ortomosaico y el modelo digital de elevaciones son los productos fotogramétricos resultantes a partir de los cuales podemos extraer métricas 2D y 3D.

### ***Obtención de métricas de complejidad 2D y 3D del hábitat***

Para obtener el porcentaje de cobertura de grupos funcionales presentes en las zonas a modelar (i.e., coral vivo, alga, esponja, coral muerto, roca, arena, etc.), se implementa una clasificación fotogramétrica de puntos por color, en donde mediante un patrón de colores se discriminan los puntos del grupo morfo funcional o tipo de sustrato de interés y se extrae el área de cobertura.

Para la obtención de las métricas de complejidad 3D del hábitat (i.e., índice de fractalidad, pendiente, rugosidad, etc.), se requiere exportar los modelos digitales de elevación y ortomosaicos a software de análisis espacial tales como

cómo QGIS, ERDAS, GVSIG, ArcMap o IDRISI SELVA, y georreferenciar los puntos de control en el mapa. Adicionalmente, es necesario georreferenciar el MDE con la ortofoto referenciada, por lo que debe repetirse el paso anterior, crear una máscara del área y posteriormente trazar el polígono de interés. A continuación, se recorta el MDE y se selecciona el polígono trazado. Posteriormente, se cambia la proyección de las coordenadas a UTM para poder calcular el área, el volumen y las variables de complejidad 3D del hábitat.

La rugosidad superficial se calcula mediante la diferencia del área superficial respecto al área planar, utilizando las herramientas que cada software de análisis espacial posee. Por su parte, para la obtención del "índice de dimensión fractal", los MDE deben exportarse en formato IMAGINE ya que debido a la estructura digital de este formato permite almacenar ese tipo de dato. Posteriormente, mediante las herramientas de análisis de texturas según sea el software, se genera un mapa del transecto en donde se representa el índice de fractalidad (Figura 2C). La fractalidad no tiene límites predefinidos por lo que solo es comparable entre los modelos tomados por el mismo sensor y condiciones. Finalmente, el cálculo de la pendiente se realiza a partir de los MDE por medio de la herramienta que calcule la pendiente dentro del software de análisis espacial de su preferencia. El producto resultante será un mapa de pendiente del transecto que representa el grado de inclinación del modelo (Figura 2D).

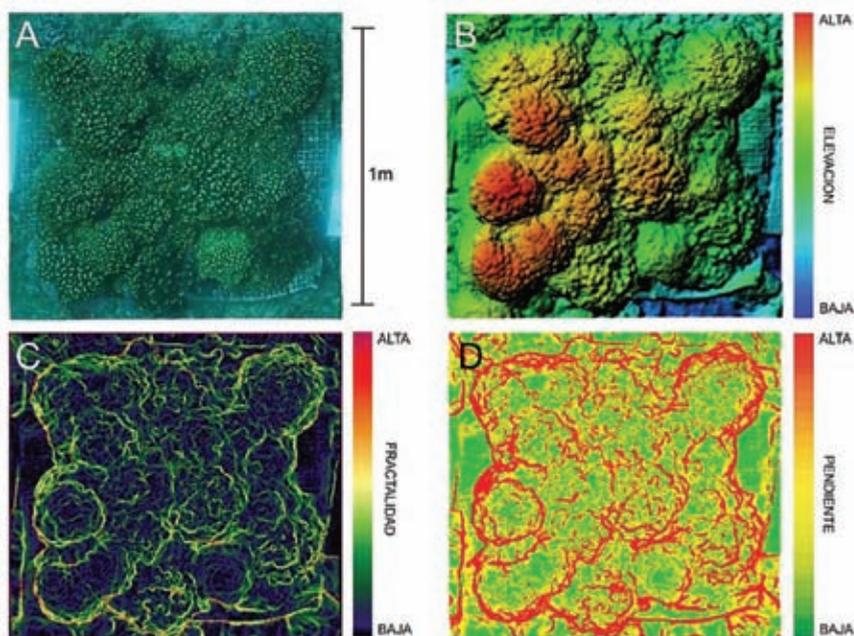
### Caso de estudio

#### *Caracterización 3D en alta resolución de sistemas de restauración arrecifal en bahías de Huatulco, Pacífico sur mexicano*

Se ha identificado que los arrecifes de bahías de Huatulco funcionan como un reservorio de especies y contribuyen a la conectividad genética entre sitios lejanos, por lo que son considerados como las zonas arrecifales con mayor relevancia del Pacífico sur mexicano<sup>15,16</sup>. A pesar de la importancia de los arrecifes en la zona, existe evidencia de que a partir de la construcción de infraestructura turística desaparecieron arrecifes que se desarrollaban en La Dársena y Manzanilla, así como una porción importante de La Entrega<sup>16,17</sup>. Esto se ha visto agravado por eventos de El Niño, así como eventos hidrometeorológicos tales como huracanes y tormentas<sup>18,19,20</sup>, que en conjunto han ocasionado una reducción significativa en la cobertura de coral vivo y la desaparición parcial o total de parches arrecifales en el área.

En respuesta a las necesidades de conservación de los arrecifes de coral y con el fin de expandir las actividades de restauración del mismo, describimos la implementación del segundo paso del protocolo de restauración

activa jardinería de áreas arrecifales desnudas<sup>21</sup>. En primer lugar, se instalaron dentro de la zona arrecifal rocosa de Punta Chahué 10 sistemas de restauración fabricados a partir de malla de polietileno de alta densidad de 1 m x 1 m, dentro de los cuales se sujetó un número variable de corales de oportunidad de *Pocillopora* spp. Una vez instaladas las unidades de restauración, se realizó un seguimiento mensual fotogramétrico de cada sistema de enero del 2019 a enero del 2020. La captura en vídeo de estas unidades de restauración se realizó mediante una cámara GoPro (GoPro Hero 4) con un sensor óptico de tipo CMOS/CCD de tamaño de lente de 1/2.3", siguiendo una combinación de barrido en forma de césped y tipo monumento.



**Figura 3.** Productos fotogramétricos obtenidos a partir de un sistema de restauración arrecifal en Punta Chahué, Pacífico sur mexicano. A) ortomosaico. B) modelo digital de elevaciones (MDE). C) mapa de dimensión fractal. D) mapa de pendiente.

A partir de los modelos tridimensionales obtenidos se determinaron parámetros de crecimiento y salud coralina (cobertura de coral vivo y coral muerto, además de la cobertura de grupos morfo funcionales presentes, mediante la clasificación fotogramétrica de puntos por color), así como variables de complejidad 3D del hábitat (índice de fractalidad, pendiente y rugosidad superficial). Respecto a los parámetros de crecimiento coralino

(cobertura de coral vivo) y las variables de complejidad 3D del hábitat, se identificó una relación negativa entre estas dos características; es decir, a medida que incrementó el área de cobertura de coral (hasta 221% después de 13 meses respecto al área de cobertura inicial), las variables de complejidad 3D del hábitat disminuyeron. Este evento resultó más evidente en los bordes de las colonias que se encontraban más cercanas entre sí (debido a la fusión de exoesqueletos), por lo que una vez fusionadas las colonias al interior de la malla, los valores más altos de las variables de complejidad 3D, se concentraron en las colonias que estaban cercanas a los bordes de la malla y no en el centro o al interior de esta, originando una placa de coral continua a medida que las colonias cercanas se fusionan.

## Recomendaciones

La fotogrametría digital submarina ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para la obtención y evaluación de parámetros importantes relacionados con la salud, crecimiento y estructura 3D de colonias de coral, así como para porciones relativamente grandes de arrecife. Adicionalmente, las técnicas empleadas para la reconstrucción 3D representan un método no invasivo de fácil acceso y repetible en distintos ambientes. Mediante esta metodología, es posible la evaluación de cambios en el crecimiento, así como en la estructura física 3D de los arrecifes, por lo que puede ser empleada como una alternativa para cuantificar la recuperación de la estructura 3D en zonas arrecifales perturbadas.

**Información suplementaria:** video: *Modelo de colonias de coral en la zona arrecifal de La Entrega, Bahías de Huatulco* <https://youtu.be/Xo2pA6Ro-9U>

## Bibliografía

1. Ferrari, R., et al. *Habitat structural complexity metrics improve predictions of fish abundance and distribution*. *Ecography* 41(7):1077-1091 (2018).
2. Harborne, A. R., et al. *Biotic and multi-scale abiotic controls of habitat quality: their effect on coral-reef fishes*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 437:201-214 (2011).
3. Graham, N. & K. Nash. *The importance of structural complexity in coral reef ecosystems*. *Coral Reefs* 32:315-326 (2013).
4. Holbrook, S. J., et al. *Variation in structural attributes of patch-forming corals and in patterns of abundance of associated fishes*. *Mar. Freshw. Res.* 53(7):1045-1053 (2002).
5. Vytopil, E. & B. Willis. *Epifaunal community structure in Acropora spp. (Scleractinia) on the Great Barrier Reef: implications of coral morphology and habitat complexity*. *Coral Reefs* 20(3):281-288 (2001).

6. Bergsma, G. S. Coral mutualists enhance fish abundance and diversity through a morphology-mediated facilitation cascade. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 45:151-161 (2012).
7. Graham, N.A.J., et al. *Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103:8425–8429 (2006).
8. De'ath, G., et al. *The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109(44):17995-17999 (2012).
9. Urbina-Barreto, I., et al. (2021). *Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscales*. *Ecol. Indic.* 121:107151 (2021).
10. Burns, J. H. R., et al. *Utilizing underwater three-dimensional modeling to enhance ecological and biological studies of coral reefs*. *ISPRS Archives* 40(5): (2006).
11. Ferrari, R., et al. *3D photogrammetry quantifies growth and external erosion of individual coral colonies and skeletons*. *Sci. Rep.* 7(1):1-9 (2017).
12. Combs, I. R., et al. *Quantifying impacts of stony coral tissue loss disease on corals in Southeast Florida through surveys and 3D photogrammetry*. *PLoS One* 16(6):e0252593 (2021).
13. Young, G. C., et al. *Cost and time-effective method for multi-scale measures of rugosity, fractal dimension, and vector dispersion from coral reef 3D models*. *PLoS One* 12(4): e0175341 (2017).
14. Westoby, M.J., et al. *'Structure -from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology* 179:300-314 (2012).
15. López-Pérez, A., et al. *Corales pétreos, equinodermos y peces asociados a comunidades y arrecifes coralinos del Parque Nacional Huatulco, Pacífico sur mexicano*. *Rev. Mex. Biodivers.* 85(4):1145-1159 (2014).
16. Glynn, P. W. & G. E. Leyte-Morales. *Coral reefs of Huatulco, West Mexico: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec*. *Rev. Biol. Trop.* 45(3):1033-1047 (1997).
17. López-Pérez, R. A., et al. *Cambio en la dominancia de la comunidad arrecifal en Chachacual, Bahías de Huatulco, Oaxaca*. *Ciencia y Mar* 16(4):33-38 (2002).
18. López-Pérez, A., et al. *Reef Community Changes Associated with the 2009–2010 El Niño in the Southern Mexican Pacific*. *Pac. Sci.* 70(2):175-190 (2016).
19. Reyes-Bonilla, H., et al. *Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the anti-El Niño event (1997-1999) on coral reefs of the western coast of México*. *Coral Reefs* 21(4):368-372 (2002).
20. Lirman, D., et al. *Combined effects of three sequential storms on the Huatulco coral reef tract, Mexico*. *Bull. Mar. Sci.* 69(1):267-278 (2001).
21. Rinkevich, B. *Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits*. *Restor. Ecol.* 3:241-251 (1995).

## Técnicas de monitoreo oceanográfico para la detección de variables que inciden en la sobrevivencia de recursos marinos

---

Arturo Hernández Velasco\*  
Raziel Hernández Pimienta\*  
Alfonso Romero Castro\*

---

### RESUMEN

Con la ayuda de sensores oceanográficos se registran variables ambientales para caracterizar las condiciones físicas en algún sitio de importancia biológica o ecológica, así como también para correlacionar dichas variables con datos biológicos en los sitios evaluados. Para el desarrollo de este monitoreo se instalan sensores en sitios similares que registran variables como temperatura, oxígeno disuelto y salinidad (depende el equipo utilizado). Dichos instrumentos se programan para que recaben información por un periodo de tiempo definido. Transcurrido ese periodo de tiempo se recuperan los instrumentos, se descarga la información y se instalan nuevamente., De esta manera se termina aprovechando esta maniobra de descarga de información para realizar limpieza, calibración y mantenimiento de los instrumentos. Los datos colectados ayudan a tener un mejor conocimiento y entendimiento sobre las variaciones ambientales que se pueden presentar y, en ocasiones, asociar estas variaciones con la producción pesquera, cambios en las distribuciones de especies, presencia de especies invasoras o eventos de mortalidad masiva relacionados a estas variaciones ambientales. El caso de estudio presentado en dicho documento contiene información recolectada de proyectos donde participan hombres y mujeres de comunidades costeras realizando ciencia participativa en donde han documentado con censos biológicos y oceanográficos como se han presentado las enfermedades emergentes y la mortalidad masiva de organismos marinos, los cuales han sido fenómenos cada vez más frecuentes en los últimos 30 años (Rogers-Bennett et al 2012, Montgomery et

---

\* Comunidad y Biodiversidad A.C., calle isla del peruano #215, col Lomas de miramar, guaymas Sonora cp 85448, México

al., 2019). El monitoreo oceanográfico brinda una parte de las respuestas a los factores que inciden en este tipo de eventos. Siendo variables como temperatura y oxígeno disuelto las predominantes en la sobrevivencia de muchos organismos bentónicos de alto valor comercial como la abulón (*Haliotis spp*) y caracoles (*Megastrea spp*), siendo este tipo de monitoreos base en la toma de decisiones para el manejo y aprovechamiento de las mismas.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Se recomienda tener embarcación de apoyo en superficie, contar con boyas de seguridad y mantener comunicación entre embarcaciones si hay más de una. Para las personas que participan en la recuperación e instalación de sensores oceanográficos se recomienda un nivel de experiencia de buceo: PADI Advance Open Water o equivalente. Las actividades se realizan en parejas, apegados a procedimientos y estándares de seguridad establecidos por instituciones de buceo internacionales.

La instalación de los sensores y por ende el monitoreo oceanográfico con este tipo de instrumentos debe realizarse en profundidades menores a los 25 m (considerando tiempo que se requiere para instalar y retirar sensores de sistemas de anclaje).

Antes de cada día de operaciones se debe consultar tabla de mareas y condiciones climáticas del sitio a visitar para planificar la inmersión acorde a la corriente, oleaje y complejidad del sitio.

Durante cada maniobra se debe de llenar una bitácora de operación donde se registra sitio (con coordenadas geográficas), fecha y hora de instalación; retiro del sensor y número de serie del sensor con el que se trabajara.

## **Objetivos**

Registrar las variaciones en las condiciones físicas del agua como: oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y conductividad del mar a lo largo del tiempo en un sitio de importancia biológica, pesquera o que presente características especiales para su investigación.

## **Materiales y métodos**

Para realizar los buceos se necesita equipo básico de buceo (traje acorde con temperatura del agua, aletas, visor, esnórquel y sistema de lastre), computadora, BCD, regulador (con manómetro, profundímetro, brújula y fuente de aire alternativa) y tanque de buceo. Para realizar la manipulación de sensores

se necesita: bolsa de red, cinta aislante, plumón de aceite, lápices, formato impreso, abrazaderas de plástico, desarmador, cuchillo de buceo, abrazaderas metálicas, desarmador con punta de tuerca de la medida de la abrazadera. Las embarcaciones deberán contar con GPS, sistema de comunicación (radio de banda marina o privada, teléfono celular y/o satelital), además de un kit de herramientas y repuestos básicos para equipo de buceo y embarcación. Importante siempre un par de baterías extras para GPS y para los sensores.

### ***Programación y preparación de sensores***

Se recomienda utilizar sensores multivariados como el CTD SeaBird que registra temperatura, oxígeno disuelto y salinidad o el sensor MiniDOT que registra temperatura y oxígeno disuelto en el agua.

Los sensores de ambos modelos ya vienen programados directamente por el fabricante, en caso de que deseemos cambiar esa configuración de intervalos de tiempo es recomendable revisar manual de configuraciones y hacerlo acompañado de pruebas de parámetros.

El sensor se prepara con dos baterías nuevas (Litio AA) y con una bolsa de sílica gel desecante en su interior. Se procede a cerrar el sensor y a cubrirlo con cinta aislante dejando descubierto la membrana y tapa del sensor. La cinta aislante funciona para facilitar la limpieza de organismos epibiontes (*fouling*). En la cinta se deberá escribir con plumón permanente: número de serie del instrumento, propietario del sensor y número de contacto de alguna persona responsable del sensor en caso de pérdida del equipo.

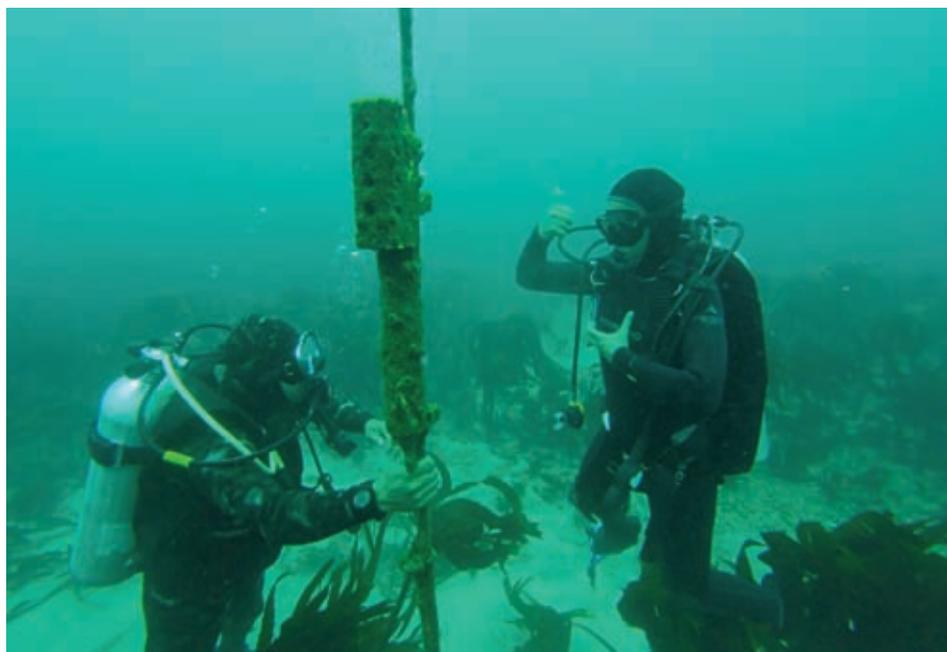
### ***Instalación de sensores***

Se transportan los sensores en cajas de plástico que protegen de golpes durante el traslado al sitio de instalación. Estando en el punto objetivo donde se encuentra el anclaje se debe abrir el sensor en la embarcación con mucha precaución y activar el botón de “encendido”. Esperar a que el sensor parpadee cinco veces para corroborar que está encendido y volver a cerrarlo. Se vuelve a meter la bolsa de sílica y se procede a cerrar con precaución. Cubrir la parte externa del sensor con cinta aislante.

Se coloca un cabo de descenso lo más cercano al sitio de colocación, el cual funcionará de guía para buscar el anclaje en el fondo. Personal de apoyo en superficie proporcionará la bolsa red con herramientas y sensor a instalar. Se desciende de manera controlada siguiendo el cabo. Ya en el fondo se procede a la maniobra de búsqueda del sistema de anclaje empleando técnicas de

búsqueda y recuperación acordes a la visibilidad y complejidad del fondo donde se encuentra el sistema de anclaje. Una vez identificado el sistema de anclaje se procede a fijar el sensor en dicha base, se sujeta el sensor por medio de cinta aislante, abrazaderas de plástico y abrazaderas de acero inoxidable al sistema de anclaje. Todos estos sistemas de sujeción deberán de ser lo suficientemente durables considerando el tiempo en el que permanecerá el sensor bajo del agua. Es importante fijarlo a una base anclada en el fondo o algún sitio sólido para evitar que se desprenda o mueva de lugar objetivo. El sensor CTD tiene que ser instalado de manera vertical y el MiniDOT en posición horizontal. Ambos siempre deben de estar sujetos directamente en el sistema de anclaje en una de las líneas de acero inoxidable. Se deben colocar al menos 3 cinchos o abrazaderas de 1/2" al colocar cada sensor. También se coloca un grillete de acero inoxidable que agarra al sensor del anclaje como refuerzo extra. Los amarres no deben de ser muy fuertes ya que puede dañarse el sensor al apretar de más el amarre (Fig 1).

Registrar hora al momento de instalar el sensor, ya que a partir de esta se comenzarán a considerar los datos oceanográficos registrados por el instrumento. La hora registrada debe anotarse al subir a la embarcación en la bitácora de campo.



**Figura 1.** Instalación de un sensor en La Bocana.

### *Recuperación de sensores*

El tiempo que debe transcurrir para recuperar los sensores dependerá de la frecuencia con la que se tomen los datos oceanográficos, ya que esto influye en el tiempo de vida de las baterías. Por ejemplo, si el sensor registra datos cada 10 minutos, el tiempo de vida de las baterías será de 24 meses (depende del equipo a utilizar y del fabricante de las baterías de Litio).

Para recuperar los sensores oceanográficos se deberá hacer el plan de buceo, llegar al sitio y localizar con el GPS el punto donde se encuentra el sensor. La pareja con la herramienta necesaria desciende por el cabo hasta llegar al sistema de anclaje. Identificado el sensor y sistemas de amarre se utilizan las pinzas de corte para quitar las abrazaderas de plástico que sostienen el sensor al cable. Una vez recuperado el sensor deberá ser introducido inmediatamente en la bolsa de buceo para evitar que se golpee o que se pierda.

### *Descarga de información*

Antes de comenzar a descargar los datos se deben limpiar los sensores minuciosamente usando un cepillo de plástico de cerdas blandas y agua. Asegúrese de tener registrado en la bitácora de campo el número de serie de cada sensor y el sitio al que pertenece para mantener un orden. En caso de reemplazar algún sensor se deberá anotar el número de serie y motivo de por qué fue reemplazado. Posteriormente se comienza a remover la cinta aislante por completo. Es muy importante mantener cerrado el sensor para la limpieza. La limpieza del sensor en las partes de plástico se puede llevar a cabo con la ayuda de un cepillo de plástico para remover epibiontes, evita tocar membranas o partes delicadas de los equipos, ya que podríamos dañar la membrana y dejar inservible el equipo para el futuro. Las membranas se deben limpiar suavemente con un hisopo. Si se observan bioincrustaciones, se recomienda remojar el sensor en agua con vinagre al 10 % para eliminarlos sin dañar el sensor.

El procedimiento para descargar la información de los sensores dependerá del modelo que utilice. Siguiendo las especificaciones y procedimientos de cada fabricante se descarga la información, la cual se recomienda respaldar en al menos otras dos unidades externas con la finalidad de contar con tres copias de los datos obtenidos del sensor y los gráficos generados. Ya descargada la información se procede a la limpieza de las carpetas o archivos dentro del sensor, recordando borrar la información del sensor (solo los datos, no carpetas ni archivos del manual instalado en el sensor). Se recomienda reem-

plazar las baterías al terminar el proceso. Para esta operación es altamente recomendable seguir las recomendaciones y procedimientos de descarga y actualización de sensores de cada fabricante.

## **Recomendaciones**

El sistema de anclaje de los instrumentos oceanográficos puede variar dependiendo las condiciones del sitio y el equipo a utilizar. Sin embargo, es importante que sean resistentes a condiciones de oleaje y corriente para que no se muevan de su sitio. Para de esta manera evitar la pérdida del instrumento.

Es altamente importante crear copias de respaldo de la información para evitar la pérdida de datos. Cuando se descarga la información crear un sistema nomenclatura adecuada para nombrar cada uno de los archivos de datos que se descarguen, por ejemplo: 2022\_13\_04\_Mexico\_LaGuanera\_15m\_MiniDOT10234, con la finalidad de poder identificar series de datos más fácilmente.

Se deberán de tomar en cuenta los recursos económicos disponibles, temporalidades, plazo de ejecución, objetivos del monitoreo, equipo y logística necesaria por cada sitio, cuando de diseña y planifican las campañas de monitoreo oceanográfico.

El apoyo multisectorial de comunidades pesqueras, instituciones académicas, así como de las instituciones gubernamentales y fundaciones es realmente primordial para ejecutar proyectos a largo plazo como el monitoreo oceanográfico.

Cada campaña de monitoreo oceanográfico deberá contar por capacitaciones y pláticas de recordatorio con el fin de estandarizar metodologías y procedimientos empleados en dicha campaña.

Conformar grupos multisectoriales mixtos donde participen de manera efectiva en la generación y análisis de información.

## **Información suplementaria**

Manual de monitoreo oceanográfico

[https://cobi.org.mx/wp-content/uploads/2021/05/Protocolo-Monitoreo-Oceanografico\\_COBI2018.pdf](https://cobi.org.mx/wp-content/uploads/2021/05/Protocolo-Monitoreo-Oceanografico_COBI2018.pdf)

## **Bibliografía**

- Rogers-Bennett, L. et al. Dinoflagellate bloom coincides with marine invertebrate mortalities in Northern California. *Harmful Algae News* 46, 10-11 (2012).
- Montgomery, D. W., Simpson, S. D., Engelhard, G. H., Birchenough, S. N. R. & Wilson, R. W. Rising CO<sub>2</sub> enhances hypoxia tolerance in a marine fish. *Sci. Rep.* 9, 1-10 (2019).



## Pásame la botella: muestreo subacuático para la caracterización del sistema de carbonatos

---

Celeste Sánchez-Noguera\*  
Carla F. Berghoff\*\*  
Lucía Epherra\*\*\*  
José Carlos Hernández\*\*\*\*

---

### Introducción

El océano desempeña un papel importante en la captura del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) liberado a la atmósfera por las actividades humanas. Esta absorción es beneficiosa porque modera el cambio climático (CC), un fenómeno global de aumento de la temperatura superficial, del nivel del mar, de eventos extremos y de cambio de corrientes marinas que afecta al medio marino. Sin embargo, como consecuencia de la absorción de  $\text{CO}_2$  ocurre la acidificación oceánica (AO), un cambio en la química del sistema de carbonatos (SC) marino, que conduce a la disminución del pH, el aumento de carbono inorgánico disuelto (CID) y la disminución en la concentración de ión carbonato<sup>[1]</sup>. Las primeras investigaciones en la química del SC datan de mediados del siglo pasado<sup>[2,3]</sup>. Han ganado auge en las últimas dos décadas por el impacto

- 
- \* Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica.  
\*\* Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Mar del Plata, Argentina  
\*\*\* Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Mar del Plata, Argentina Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación, Argentina  
\*\*\*\* Observatorio Marino de Cambio Climático-Punta de Fuencaliente (La Palma). Universidad de La Laguna (ULL), Islas Canarias, España

significativo que generan el CC y la AO en los ecosistemas marinos y por sus repercusiones ecológicas y socioeconómicas en las pesquerías, la acuicultura y el turismo<sup>[4-6]</sup>. Por ello, se han desarrollado numerosos programas de monitoreo del SC en distintas regiones del océano para comprender los efectos de la AO. La AO tiene alta relevancia a nivel global, y en 2015 fue identificada como un problema ambiental a ser abordado en todos los niveles de la sociedad, bajo el Objetivo de Desarrollo Sostenible 14.3 de la Agenda Internacional de Desarrollo de las Naciones Unidas.

Las distintas regiones del océano responden de manera diferente al aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico, y tanto la variabilidad natural del SC como las tendencias de cambio son poco conocidas en ciertas regiones. Los cambios en el SC, si bien significativos, son muy pequeños y se observan en escalas de tiempos largas (decadales). Por ello se requiere de mediciones precisas de al menos dos de los cuatro parámetros medibles: pH, CID, presión parcial de CO<sub>2</sub> ( $p\text{CO}_2$ ) y alcalinidad total (AT). A su vez, debido a que los cambios no son homogéneos, es crucial mantener observaciones frecuentes de series de tiempo (SdT) largas en distintas localidades, para comprender la variabilidad natural y la tasa de cambio del SC. Estas SdT se pueden llevar a cabo, con mediciones en el laboratorio de muestras de agua recolectadas en el campo o mediante el uso de sondas de medición autónomas colocadas en plataformas (boyas en zonas rocosas). Tradicionalmente, las muestras de agua se han recolectado desde embarcaciones con muestreadores (botella Van Dorn o Niskin), para lo cual existen diversos protocolos disponibles<sup>[7-10]</sup>. Recientemente, también se están llevando a cabo la recolección de muestras de agua discretas directamente en botellas durante las actividades de buceo con tanque (SCUBA). Esto resulta muy útil porque permite combinar el muestreo con otras actividades de monitoreo subacuático o incluso con el buceo recreativo. No obstante, a la fecha no existen protocolos que aborden este tipo de muestreo directo o la instalación/recuperación de sondas de medición autónomas en la costa. Este documento describe las actividades de muestreo del SC asociadas con el buceo SCUBA.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Las actividades científicas desarrolladas mediante buceo SCUBA requieren protocolos de seguridad adicionales. A continuación, se indican los procedimientos mínimos de seguridad asociados con el muestreo subacuático del SC. El control de la flotabilidad es muy importante, particularmente al utilizar bolsas subacuáticas de levantamiento para maniobrar con equipo pesado

bajo el agua. Muchas sondas de medición autónoma se colocan en estructuras pesadas, cuya instalación requiere el uso de este tipo de equipo de buceo. Al usar botellas para recolectar muestras de agua hay que tener varios cuidados y respetar los principios básicos de seguridad durante su manipulación. Se recomienda usar bolsas de malla para guardar las botellas y asegurar la bolsa con un gancho al chaleco compensador de flotabilidad (BCD, por sus siglas en inglés), en lugar de llevar las botellas en la mano. Esto garantiza tener las manos libres para realizar las maniobras de buceo. Las botellas se deben sacar una a una sin abrir por completo la bolsa, para evitar que se salgan por accidente. Las botellas de plástico tienen flotabilidad positiva y cuando están vacías ascienden rápidamente a la superficie. Si alguna se sale de la bolsa no hay que seguirla, porque esto puede representar un riesgo para la salud del buzo.

## Objetivos

Este capítulo describe, de manera general, las metodologías subacuáticas mediante buceo SCUBA utilizadas en el campo para el estudio de la química del SC. Se describen dos casos de estudio: (1) uno para la recolecta directa de muestras de agua discretas, y (2) otro para la instalación y recuperación de sondas de medición autónomas.

## Materiales y métodos

### *Recolecta de muestras discretas*

Además de muestras para medir al menos dos parámetros del SC, se debe medir la temperatura, salinidad y profundidad del sitio de recolecta, porque dicha información es requerida para los cálculos del SC. El tipo de botellas a utilizar (material y capacidad) dependerá del método de determinación de laboratorio. Los detalles técnicos no se incluyen aquí y se pueden consultar en protocolos específicos para estudios del SC<sup>[7, 9-11]</sup>.

1. Todas las botellas se deben colocar cerradas dentro de una bolsa de malla y debe sujetarse al BCD con un gancho.
2. Para facilitar la manipulación de las botellas se recomienda usar una bolsa de malla adicional (ver puntos 4c y 4d), que puede llevarla el compañero de buceo.
3. La recolección de muestras se debe realizar al final del buceo, antes del ascenso a la superficie.

4. Idealmente el proceso de recolección de las muestras se debe llevar a cabo entre dos buzos (Figura 1).
  - a. El primer buzo saca las botellas de una a una y las llena lentamente, evitando la formación de burbujas. Se sugiere que la tapa o el tapón se encuentre sujeto al frasco o botella correspondiente.
  - b. Cerrar la botella con la tapa o el tapón correspondiente.
  - c. Pasarle la botella con la muestra al segundo buzo, quién la colocará en la bolsa de malla adicional.
  - d. Repetir los pasos a-c con todas las botellas. Al finalizar, la bolsa de malla del primer buzo estará vacía y la bolsa de malla del segundo buzo contendrá todas las botellas con las muestras.
5. Realizar un ascenso controlado a la superficie, siguiendo los protocolos básicos de buceo.
6. En la superficie, entregar la bolsa de malla con las muestras a los colegas a bordo de la embarcación. Así se evita que las botellas se suelten o se dañen cuando el buzo realiza la maniobra de salida del agua.
7. Colocar todas las botellas con muestras en una nevera portátil (“cooler”) sin hielo, para mantenerlas a temperatura fresca y en oscuridad. Las muestras del SC no deben congelarse.
8. Anotar en la tabla de buceo la posición geográfica del sitio, fecha, hora y profundidad a la que se recolectaron las muestras.
9. Las muestras para CID y AT se preservan con cloruro de mercurio II, cuya cantidad dependerá del volumen de la botella que se utilizó para recolectar la muestra<sup>[7, 11]</sup>. Por su nivel de toxicidad debe manipularse con precaución.

### ***Instalación y recuperación de sondas autónomas***

Existen diversas sondas autónomas de medición de pH y  $p\text{CO}_2$ . Si bien cada una tiene particularidades técnicas sobre su funcionamiento, todas comparten similitudes en términos de su instalación en el campo, en estructuras subacuáticas de plástico (Figura 2), metal o de concreto (Figura 3), de manera permanente o temporal.

#### **A) Instalación**

1. Antes de ingresar al agua se deben llevar a cabo las siguientes actividades de preparación a bordo de la embarcación:

- a. Calibración de la sonda y revisión de las baterías (en sondas autónomas).
  - b. Encender la sonda y asegurar su correcto funcionamiento.
  - c. Sujetar correctamente la bolsa de levantamiento a la estructura, con ganchos o nudos marineros que aseguren la carga y sean fáciles de soltar bajo el agua. La cantidad de bolsas de levantamiento requeridas varía dependiendo del tamaño y peso de la estructura y la capacidad de la bolsa.
  - d. Inflar con aire la bolsa de levantamiento antes de colocarla en el agua. Esto garantiza que la estructura se mantenga a flote en la superficie y evita accidentes de buceo.
  - e. En el caso de estructuras a ser fijadas al fondo, se requiere de un taladro neumático (Figura 2). Para ello, deberá colocarse en un lugar seguro de la costa un compresor de aire con la potencia y longitud de cable suficiente para llegar al lugar de colocación de las estructuras. En el caso de estructuras que estarán un tiempo limitado en el fondo, se deberán fijar con plomos o estructuras de concreto (Figura 3) lo suficientemente pesadas para evitar que se muevan y que ese movimiento interfiera en la medición de la sonda.
2. Los buzos ingresan al agua y los colegas a bordo de la embarcación les pasan la estructura y/o la sonda. Las personas a bordo de la embarcación no deben soltarlas hasta asegurarse que la bolsa de levantamiento se sostiene a flote en la superficie y que los buzos la sujetan correctamente.
  3. Con la estructura y/o sonda flotada en la superficie, los buzos inician el descenso controlado, liberando lentamente el aire del BCD y de la bolsa de levantamiento.
  4. Al llegar a la profundidad donde se va a instalar la estructura y/o sonda, vaciar por completo el aire de la bolsa de levantamiento antes de desatarla de la estructura y/o sonda. Desatar la bolsa con un remanente de aire aumenta el riesgo de perderla o de ocasionar un ascenso rápido y descontrolado del buzo que la esté sujetando.

#### B) Recuperación

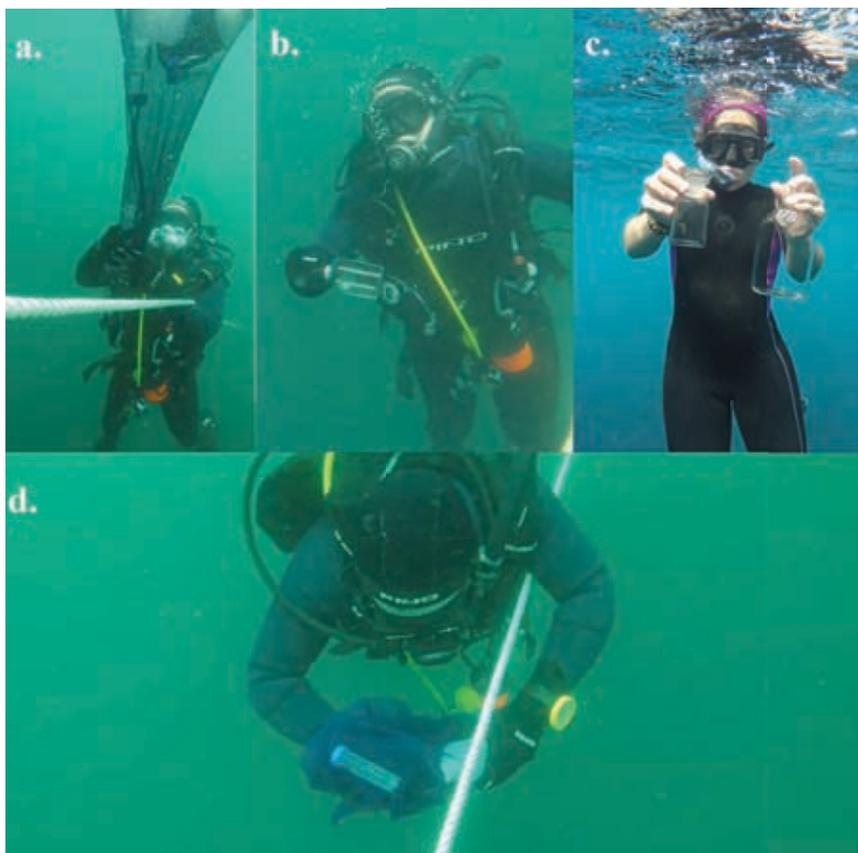
1. Descender con la bolsa de levantamiento completamente vacía.
2. Sujetar la bolsa de levantamiento a la estructura con un gancho o un nudo marinero.

3. Llenar despacio la bolsa de levantamiento, hasta lograr flotabilidad neutra de la estructura y/o sonda. Usar el regulador auxiliar y dispensar el aire despacio y en volúmenes pequeños, para evitar un llenado rápido y abrupto.
4. Al lograr la flotabilidad neutra comenzar el ascenso controlado. Durante el ascenso se debe vaciar gradualmente y de manera simultánea el aire del BCD y de la bolsa de levantamiento, manteniendo flotabilidad neutra en todo momento.
5. Al llegar a la superficie, inflar nuevamente la bolsa de levantamiento para mantener la estructura y/o sonda flotando en la superficie. Esto evita el agotamiento de los buzos, mientras se hace la maniobra para subir la estructura y/o sonda a la embarcación.
6. La bolsa de levantamiento se debe desatar y desinflar sólo cuando la estructura y/o sonda esté segura a bordo de la embarcación.
7. En el caso de las estructuras fijas a ser recuperadas, se aconseja realizar la maniobra en dos inmersiones: la primera, para soltar la estructura del sitio, utilizando las herramientas necesarias en función del tipo de enganche utilizado, y una segunda inmersión, para subir toda la estructura al barco.

### **Casos de estudio**

#### *Ciencia ciudadana para el monitoreo de la AO en Mar del Plata, Argentina*

Los buzos voluntarios desempeñan un papel muy importante como ciudadanos científicos para los océanos<sup>[12]</sup>. La ciencia ciudadana es un enfoque de investigación participativo que integra el trabajo del investigador científico con el ciudadano común en distintas etapas de los proyectos científicos. Desde 2018, el Programa Dinámica del Plancton Marino y Cambio Climático (DiPlaMCC) del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Argentina, aborda el enfoque de ciencia ciudadana con buzos del Centro de Actividades Submarinas Escualo (CASE) de Mar del Plata, para monitorear la química del SC y evaluar posibles cambios a largo plazo vinculados con la AO. Las actividades se realizan con frecuencia mensual a bimensual en el sitio costero de buceo conocido como “El Veril”. Durante sus buceos recreativos en “El Veril”, los buzos del CASE recolectan con diferentes botellas (Figura 1), muestras de agua de mar a 5 metros de profundidad, que luego son analizadas por el DiPlaMCC para obtener información del SC (pH y AT), la salinidad y otras variables como el oxígeno disuelto, los nutrientes, las comunidades microbianas



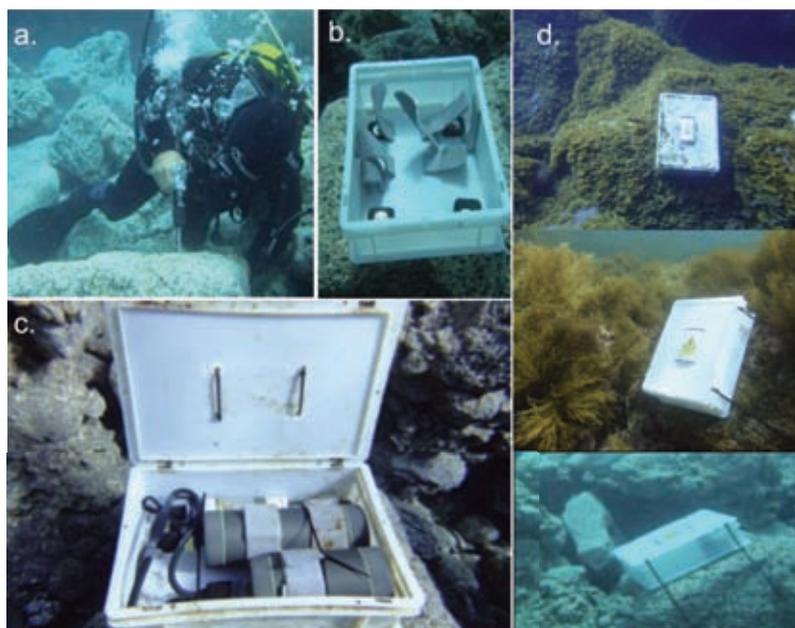
**Figura 1.** Recolecta de muestras discretas para la caracterización del SC. a. Buceador con todas las botellas vacías cerradas dentro de una bolsa de malla sujeta al BCD. b-c. Buceador recolectando con diferentes botellas al final del buceo. (b. Recolección de muestras de agua en “El Veril”, Mar del Plata, Argentina; c. Recolección de muestras de agua en “Fuencaliente”, OMaCC, isla de La Palma, España). d. Al finalizar, la bolsa de malla con todas las botellas con las muestras.

(fitoplancton y bacterioplancton) y la clorofila-a. La recolección de datos no implica ningún riesgo para los buzos del CASE; sólo requiere que posean un cierto entrenamiento en la recolecta y transporte de las muestras, para que las mismas sean de la calidad adecuada para los estudios de AO. Entre los puntos más favorables de la interacción DiPlamCC-CASE destaca la relevancia de la información que se genera a nivel local, complementaria con otras series de tiempo ecológicas que lleva a cabo el DiPlamCC, a la vez que contribuye con esfuerzos internacionales que abordan la temática de la AO, p.ej. el proyecto “DOAP” de la red NF-POGO/NANO<sup>[13]</sup>. Pero sin duda alguna, la sociedad es la que obtiene el mayor beneficio de esta

colaboración: al empoderar a los buzos ciudadanos se mejora la educación científica, lo que a su vez conlleva al desarrollo de comportamientos amigables con el ambiente y crea conciencia pública sobre la AO y los desafíos que enfrenta el océano<sup>[14]</sup>. El resultado final es un esfuerzo integrado, efectivo y coordinado para comprender y comunicar la AO y sus impactos.

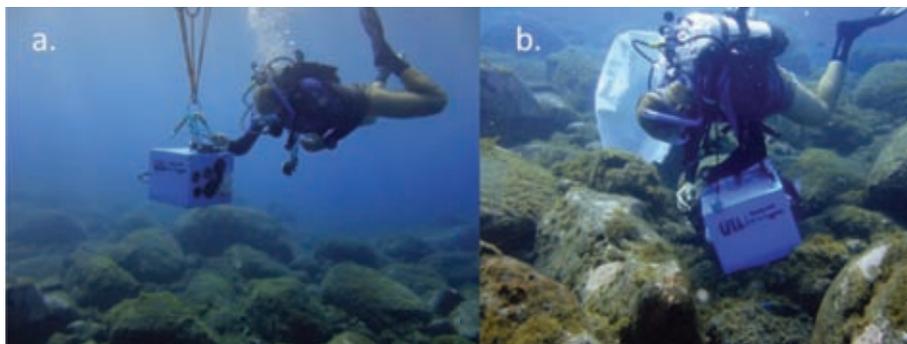
*Observatorio Marino de Cambio Climático – Punta de Fuencaliente (OMaCC),  
España*

En 2020 se creó el OMaCC en la punta sur de la isla de La Palma en el archipiélago Canario. Este enclave es un lugar donde el océano se acidifica de manera natural debido a las emanaciones de CO<sub>2</sub> que provienen de la actividad volcánica remanente del complejo volcánico Cumbre Vieja. Este observatorio se ha convertido en un centro educativo y de investigación donde se realizan de manera periódica la recolección de muestras para la caracterización del SC (Figura 1c), utilizando los protocolos descritos en el presente trabajo.



**Figura 2.** Instalación de sondas autónomas. a. Buceador taladrando roca con taladro neumático. b. Caja de plástico colocada en la zona de estudio, se pueden observar las tiras de velcro internas para asegurar los sensores, “data loggers” y baterías. c. Se pueden observar los sensores, baterías y “data loggers” en el interior de la estructura. d. Cajas de plástico colocadas en diferentes localizaciones.

Para más información sobre ambos casos consultar en la sección de información suplementaria.



**Figura 3.** Recuperación de sondas autónomas. a. Buceador con bolsa de levantamiento dirigiendo la estructura de concreto a la zona de estudio. b. Desanclaje de los mosquetones laterales de la estructura de concreto para liberar la bolsa de levantamiento una vez desinflada.

## Recomendaciones

Toda actividad de buceo SCUBA tiene riesgos asociados, y por eso resulta de vital importancia respetar los procedimientos de seguridad. No obstante, las actividades científicas que se llevan a cabo mediante buceo SCUBA requieren el establecimiento de protocolos de seguridad adicionales. La recolección subacuática de muestras discretas para el SC representa una excelente opción de muestreo oportunista, el cuál puede beneficiarse de los programas de monitoreo biológicos periódicos o las actividades de buceo recreativo. Lo más importante para lograr el éxito en este tipo de muestreo, es mantener una comunicación cercana entre el equipo de buzos y las personas a cargo del procesamiento de muestras en el laboratorio. Esto garantizará el cumplimiento de los estándares de muestreo para lograr la calidad de datos requerida, así como asegurar que la planificación del muestreo se llevará a cabo tomando en cuenta todas las medidas de seguridad de buceo.

### **Enlace a Información suplementaria electrónica**

- Página web del Programa Dinámica del Plancton Marino y Cambio Climático puede encontrar recursos de interés sobre la importancia de los océanos y mares para la vida, los bienes y servicios que brindan y las problemáticas que afrontan: <https://www.argentina.gob.ar/inidep/programa-dinamica-del-plancton-marino-y-cambio-climatico/dia-mundial-de-los-oceanos>
- “El Veril del Banco de Afuera”, es uno de los 30 proyectos seleccionados en el atlas “Mapeo de ciencia ciudadana con foco en ambiente” en Argentina, codesarrollado por el Accelerator Lab, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Dirección Nacional de Programas y Proyectos del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCYT): <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/sact/ciencia-ciudadana/el-veril-del-banco-de-afuera>
- A su vez, investigadores del INIDEP y buzos ciudadanos del CASE desarrollaron, como parte del día de la acidificación oceánica, un material audiovisual en el que brindan detalles de la experiencia y las actividades de investigación de la Acidificación Oceánica que llevan a cabo conjuntamente ambas instituciones: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_J-TYBaHGNY](https://www.youtube.com/watch?v=_J-TYBaHGNY)
- Página web del Observatorio Marino de Cambio Climático-Punta de Fuencaiente, en el que se describe el proyecto y donde se pueden encontrar recursos de interés: <https://wp.ull.es/omacc/>

### **Referencias Bibliográficas**

1. Gattuso J-P, Magnan A, Billé R, Cheung WW, Howes EL, Joos F, et al. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios. *Science*. 2015; 349(6243).
2. Dickson AG. The measurement of sea water pH. *Marine Chemistry*. 1993; 44(2-4):131-42.
3. Millero FJ, Zhang J-Z, Lee K, Campbell DM. Titration alkalinity of seawater. *Marine Chemistry*. 1993; 44(2-4):153-65.
4. Turley C, Gattuso J-P. Future biological and ecosystem impacts of ocean acidification and their socioeconomic-policy implications. *Current opinion in environmental sustainability*. 2012; 4(3):278-86.
5. Kroeker KJ, Kordas RL, Crim R, Hendriks IE, Ramajo L, Singh GS, et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global change biology*. 2013; 19(6):1884-96.
6. Hall-Spencer JM, Harvey BP. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2019; 3(2):197-206.
7. Dickson AG, Sabine CL, Christian JR. Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements. PICES Special Publications. 2007.

8. Pimenta AR, Gear JS. Guidelines for Measuring Changes in Seawater pH and Associated Carbonate Chemistry in Coastal Environments of the Eastern United States. 2018.
9. Berghoff CF. Procedimiento de determinación de pH de agua de mar por espectrofotometría con púrpura de meta-cresol. Inf Ases Transf INIDEP N° 086/20. 2020.
10. Berghoff CF, Epherra L, Pierrot D. Determinación potenciométrica de alcalinidad total de agua de mar en celda abierta. Inf Proc Op INIDEP. 2021.
11. Sánchez-Noguera C. Recolección y preservación de muestras para la medición de variables del sistema de CO<sub>2</sub> en aguas marino-costeras. Red de Investigación de Estresores Marino-Costeros en Latinoamérica y el Caribe - REMARCO. Santa Marta, Colombia. 2021.
12. Lucrezi S, Milanese M, Palma M, Cerrano C. Stirring the strategic direction of SCUBA diving marine Citizen Science: A survey of active and potential participants. PloS One. 2018; 13(8):e0202484.
13. <https://nf-pogo-alumni.org/projects/global/>
14. García-Soto C, Van der Meeren GI, Busch JA, Delany J, Domegan C, Dubsky K, et al. Advancing Citizen Science for Coastal and Ocean Research. French V, Kelllett P, Delany J, McDonough N, editors. 23th Position Paper, European Marine Board. Ostend, Belgium. 2017.



## Monitoreo batimétrico como herramienta para la identificación de agregaciones reproductivas de peces

---

Jacobo Camaal\*  
Arturo Hernández Velasco\*

---

### Resumen

Diversas especies de peces forman agregaciones. Dichas agrupaciones pueden ser como medida de protección, reproducción y/o alimentación. Este fenómeno ocurre en algunas especies donde los individuos viajan largas distancias para agregarse. En el caso particular de las agregaciones reproductivas ocurre cuando diversos organismos se agrupan en grandes grupos, consolidando cardúmenes reproductivos bien identificados, los cuales ocurren en sitios y temporadas determinadas. Y por lo general están ligados con las fases lunares y condiciones ambientales en los sitios. (Claydon, 2004; Colin, 2003; Domeier et al., 1997).

En Quintana Roo, México, se ha registrado información de agregaciones reproductivas desde 1955, en donde se hace referencia a eventos de corridas masivas o sitios de agregaciones. En la actualidad se han identificado diversos sitios donde aún existen estos eventos reproductivos y se han logrado verificar mediante censos visuales (Fulton *et al* 2018).

Considerando que algunas especies de peces se reproducen en sitios con características topográficas y ambientales muy específicas, el uso de equipo batimétrico ha resultado ser una herramienta importante para la búsqueda de sitios de estos sitios (Camarena *et al.*, 1994). Siendo un método alternativo y que combinado con inmersiones de búsqueda se han logrado verificar sitios donde ocurren este tipo de eventos.

---

\* Comunidad y Biodiversidad A.C., calle isla del peruano #215, col Lomas de miramar, guaymas Sonora cp 85448, México.

## Procedimientos mínimos de seguridad

En la fase de planeación del monitoreo es importante considerar el pronóstico del estado del tiempo, mareas y corrientes que van a ocurrir durante las fechas que se realizarán las actividades del monitoreo. Revisar las páginas web de *buoyweather*<sup>1</sup> y *Windguru*<sup>2</sup>. Las mareas se pueden consultar en la página del CICESE<sup>3</sup>, dichos pronósticos deben actualizarse a lo largo del monitoreo. Las salidas deben de planearse de tal manera que la batimetría y los buceos se efectúen en días con buenas condiciones climatológicas.

Para las inmersiones es necesario contar con certificación mínima “Open Water Diver” (PADI o equivalente) con al menos 20 buceos registrados en bitácora en condiciones similares a los sitios donde se realizarán las inmersiones. Debido a la complejidad y posible estrés por bucear en sitios con corriente, las personas líderes de campaña de monitoreo deberán de contar con certificación PADI Dive Master o equivalente, para asegurar conocimiento básico de primeros auxilios y experiencia en la planeación de inmersiones, así como tomar decisiones ante la responsabilidad de la seguridad del resto de los buceadores.

Es necesario disponer de un cilindro de oxígeno medicinal con la capacidad suficiente para evacuar en caso de emergencia. Todos los participantes deben conocer el funcionamiento y procedimiento para proveer oxígeno de emergencia. En todos los buceos se deben de seguir estándares de buceo seguro por organizaciones internacionales.

Durante el monitoreo submarino siempre se debe evitar bucear a profundidades mayores a 20 metros. En el caso de que se planifique bucear más profundo es necesario emplear planes de buceo conservativos, tomando en cuenta el número de inmersiones que se tienen planeadas y procurando hacer los buceos profundos al inicio del monitoreo y al inicio del día.

Cada inmersión deberá ser cuidadosamente planeada y todos los participantes (buzos, capitanes, personal de apoyo en tierra) deberán comprender los planes del día a su perfección. Se debe seleccionar la profundidad y tiempo de buceo, según las condiciones del sitio y considerar las tablas de buceo. Por lo general se hacen inmersiones sin descompresión. Es necesario explicar el plan de buceo de manera clara y breve a todos los buceadores.

---

1 <http://www.buoyweather.com>

2 <http://www.windguru.com>

3 <http://oceanografia.cicese.mx/predmar/calmen.php>

Los buceos de búsqueda siempre deberán de realizarse con una boya de superficie, nadando a favor de la corriente, la embarcación debe de seguir al grupo de buzos guiándose con la boya y burbujas e ir tomando coordenadas o ruta mientras se desplaza siguiendo al equipo de monitoreo submarino.

## Objetivos

*Monitoreo Batimétrico:* generar mapas para facilitar la búsqueda e identificación de agregaciones de desove de peces.

*Monitoreo submarino:* identificar las especies de peces claves del área, estimar tallas y números de peces y poder identificar indicadores de actividades de desove (como cambio de coloración, comportamiento de cortejo, desove, agrupamiento).

## Materiales y métodos

### *Materiales para realizar batimetría*

1. Tener el conocimiento previo para el manejo del equipo a utilizar.
2. Embarcación con dimensiones adecuadas que garantice la seguridad de la operación.
3. Fish Finder – Lowrance HD5S con un Transducer de haz simple – Airmar TM260 50/200Khz.
4. Software: SonarViewer v<sub>2.1.2</sub>, Microsoft Excel, programa de estadística 'R', ESRI Arcmap y ArcScene.
5. Suministro de energía en embarcación para Sonar (Batería de 12 volts).
6. Tarjeta de memoria SD de 16 GB para sonar.
7. Caja estanca para guardar equipo e instructivos.
8. Recipiente de plástico para sonar dentro de embarcación (en caso de ser necesario). En embarcaciones que no cuentan con doble fondo, el Transducer se puede colocar dentro de la embarcación. Cuando la embarcación tiene doble fondo, se coloca fuera de la embarcación el Transducer.

### *Materiales para monitoreo submarino*

1. Equipo básico de buceo (traje acorde con temperatura del agua, aletas, visor, esnórquel, y sistema de lastre), computadora, BCD, regulador

(con manómetro, profundímetro, brújula y fuente de aire alternativa), tanque de buceo.

2. Equipo de monitoreo (tablas acrílico, lápices, hojas con formato impreso, GPS).
3. Señalización (bandera de buceo, bolla de señalización, silbato de emergencia).
4. Kit de herramientas y kit emergencia (botiquín, tanque de O<sub>2</sub> con regulador armado y protocolo de evacuación para la zona).
5. Sistema de comunicación (radio de banda marina o privada en la embarcación, teléfono satelital).

### ***Método para el levantamiento batimétrico***

Al realizar levantamientos batimétricos de los sitios con sonar de un sólo haz permite la generación de mapas batimétricos tridimensionales a bajo costo y la ubicación de sitios potenciales donde pudieran agregarse algunas especies de peces. También permite la identificación de cardúmenes de peces a profundidades donde el buceo es difícil o riesgoso.

Para el levantamiento de datos batimétricos en un sitio determinado es necesario que se calcule el área a muestrear y los vértices de cada sitio. Dichos vértices deben de ser introducidos al Fish Finder para ayudar al capitán con la navegación y localización del sitio a muestrear. En el mar, la embarcación debe hacer recorridos dentro del sitio trazando cuadrículas mientras el sonar del Fish Finder registra las profundidades georreferenciadas. La separación entre las cuadrículas dependerá de la resolución a la que está programado el sonar y la complejidad del sitio a muestrear. Después del muestreo los datos son transferidos al programa SonarViewer y se siguen los pasos descritos en protocolos de monitoreo batimétricos<sup>4</sup> usados para generar mapas en el SIG. A continuación, se enlista una serie de pasos para realizar un monitoreo batimétrico o elaboración de carta de profundidades. La forma más práctica o sencilla de realizar las batimetrías es la siguiente:

1. Identificar con colaboradores locales el área donde se requiere hacer la batimetría, si es posible se debe de ingresar al Fish Finder los puntos de GPS de los extremos del área donde se desea hacer la batimetría.

---

4 Heyman, W. et al. Creating a TIN from Sonar. Texas A&M University, College Station, Texas USA (2012)

- a. Al momento de ingresar los puntos de GPS al Fish Finder corrobore que las unidades y formato están de la misma manera tanto en el GPS como en el Fish Finder.
2. Una vez que tengamos los puntos de GPS y sabemos dónde está el área empezaremos la batimetría con la primera línea que marcaremos. Esta será nuestra guía por la que iremos recorriendo toda la parte externa del sitio hasta que tengamos toda la zona exterior del área marcada (en las zonas cercanas a la costa se recomienda realizar esta línea cuando la marea está alta y tranquila).
3. Una vez que tengamos el área marcada por la parte exterior será más fácil empezar a realizar la batimetría dentro del área que ya marcamos, estas podrán ser de forma vertical y horizontal formando cuadrantes (un tipo de red). Entre más cercanas sean las distancias entre líneas será mejor nuestra batimetría, ya que contaremos con más datos y obtendremos una batimetría más precisa.
  - a. Se recomienda una separación entre vuelta y vuelta del recorrido de 50 - 100 m de distancia.
  - b. Se recomienda navegar a una velocidad no mayor a 10 nudos de velocidad.

El Fish Finder debe de estar siempre sumergido en el agua y apuntando hacia abajo para un buen funcionamiento, si la embarcación no tiene doble fondo, se podrá colocar dentro de la embarcación, poniendo un recipiente con agua. Se debe de verificar que la embarcación no tenga doble fondo ya que el Transducer no funcionará correctamente por el espacio que existe entre ambos fondos de la embarcación. En caso de que nuestra embarcación cuente con doble fondo, el sonar deberá de estar colocado fuera de la embarcación.

### ***Método para el monitoreo submarino***

Conjuntando el mapeo batimétrico, el conocimiento tradicional y de expertos se identifican las áreas potenciales donde pudiesen ocurrir las agregaciones reproductivas. Identificando dichos sitios se organizan buceos exploratorios del sitio en fechas donde coincidan con el periodo de desove de la especie a buscar. Los buceos exploratorios pueden ser programados durante todo el día, pero el monitoreo de desove y validación de agregación reproductiva deberán de realizarse al anochecer (caída del sol) y al amanecer (salida del sol).

Los censos y búsquedas de eventos reproductivos se realizan empleando la técnica de buceo errante, donde el grupo de monitoreo bucea a lo largo del sitio previamente identificado con el Fish Finder, siguiendo una misma dirección de nado. Se recomienda ir con la corriente para cubrir mayor área de búsqueda. Durante el buceo se va registrando temperatura del agua, profundidad, nivel de corriente, visibilidad, especies observadas con comportamiento o anatomía que indiquen estar en etapa reproductiva y eventos de cortejo o desove (Fig 1).



**Figura 1.** Agregaciones de peces en Punta Allen.

### **Caso de estudio**

En Quintana Roo, México se ha colaborado con seis cooperativas pesqueras y 38 pescadores en siete comunidades costeras. Entre 2008 y 2018 se han explorado 39 sitios con batimetría y censos submarinos, con el apoyo de pescadores y pescadoras de la región e investigadores especialistas en agregaciones reproductivas de peces. Las personas que forman el grupo de monitoreo son capaces de identificar las especies de peces claves del área, estimar tallas y números de peces, además, identifican indicadores de actividades de desove (como cambio de coloración, comportamiento alterado, desove, agrupamiento, cortejo) y deben de saber utilizar equipo batimétrico.

Desde el 2008 se ha logrado hacer batimetrías que generaron datos para la elaboración de mapas 3D del fondo y buceos de verificación en sitios potenciales. Se ha logrado verificar ocho sitios como agregaciones reproductivas, de estos, cuatro han sido protegidos mediante la herramienta de manejo, zonas de refugio pesquero. Cabe resaltar, son los propios pescadores los que han promovido y solicitado a la autoridad pesquera que estos sitios sean protegidos bajo este esquema, ya que se han registrado varios eventos reproductivos de peces de las familias de meros (*Gerridae*), pargos (*Lutjanidae*) y jureles (*Carangidae*), que son especies de interés comercial en la región. Durante los monitoreos submarinos se han registrado cambios de coloración, comportamiento de cortejo, vientres abultados y en algunos casos se ha registrado el momento del desove (característicos de eventos reproductivos) (Fig 2).



**Figura 2.** Buceador siguiendo una agregación de peces.

## Recomendaciones

Antes de cada campaña de monitoreo es necesario realizar talleres informativos con colaboradores, involucrando a la mayor parte de actores y usuarios del recurso o área a monitorear, consolidando grupos multisectoriales que participen en estas actividades.

El apoyo de las sociedades cooperativas pesqueras, instituciones académicas, así como de las instituciones gubernamentales y fundaciones es realmente primordial para ejecutar las actividades de prospección y monitoreo de los sitios de agregaciones reproductivas de peces.

Cada campaña de monitoreo batimétrico y de buceo deberá contar con capacitaciones y pláticas de recordatorio con el fin de estandarizar metodologías empleadas en dicha campaña de monitoreo.

Una vez concluido el estudio es necesario hacer una etapa de devolución de resultados y lecciones aprendidas, con el fin de involucrar más a usuarios y a otros sectores.

## **Bibliografía**

1. Claydon, J. Spawning aggregations of coral reef fishes: characteristics, hypotheses, threats and management. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 42:265-302. (2004).
2. Colin, P., Y.J. et al. Manual for the study and conservation of reef fish spawning aggregations. Society for the Conservation of Reef Fish Aggregations Special Publication No. 1 (Version 1.0). (2003).
3. Domeier, M.L. y Colin P.L. Tropical reef fish spawning aggregations: defined and reviewed. *Bulletin of Marine Science* 60(3):698-726. (1997).
4. Fulton, S. et al. Estado de Conservación y Viabilidad de Protección los de Agregaciones Reproductivas de Peces en Quintana Roo, México. Comunidad y Biodiversidad A.C., Guaymas, Sonora, México (2018).
5. Camarena T. et al. Ensayo de Estimación de la abundancia de las agregaciones de mero *Epinephelus striatus* por Eco-integración. pag49 - 52 en: Amigos de Sian Ka'an Serie Doc 2. (1994).

## Técnicas de monitoreo de arrecifes rocosos del golfo de California, México

---

**Arturo Hernández Velasco\***  
**Melo Francisco Fernández Rivera\***  
**Imelda G. Amador Castro\***  
**Raziel Hernández Pimienta\***

---

La fauna presente en los arrecifes del Golfo de California es notablemente diversa. La región alberga más de 5,000 especies de macroinvertebrados marinos y 911 especies de peces (Brusca et al. 2010, Hastings et al., 2010). Los arrecifes rocosos han sido identificados como una fuente importante de recursos para la pesca artesanal, industrial y deportiva (Cudney-Bueno et al., 1998). La composición de los ensambles de especies asociadas a los sistemas arrecifales es el resultado de la interacción de muchos procesos que incluyen tanto factores bióticos asociados al reclutamiento, depredación, competencia y factores abióticos como el hábitat (Pauly, 1984). Para evaluar los cambios a lo largo del tiempo como resultado de fenómenos naturales (huracanes, cambio climático, migraciones, etc.) y actividades antropogénicas (aprovechamiento) sobre la flora y fauna en los arrecifes rocosos, es necesario realizar monitoreos biológicos de las comunidades. A través de la recopilación sistemática de observaciones y mediciones es posible determinar el estado actual en un momento específico. Empleando el monitoreo submarino con la técnica de transecto de banda se ha logrado identificar cambios en los arrecifes rocosos del Parque Nacional Bahía de Loreto, logrando identificar un total de 58,511 individuos de macroinvertebrados marinos y 377,883 individuos de peces.

---

\* Comunidad y Biodiversidad A.C., calle isla del peruano #215, col Lomas de miramar, guaymas Sonora cp 85448, México.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Los buceos siempre se desarrollarán con el sistema de parejas, los equipos no deberán estar separados y si lo hacen la distancia máxima no debe ser mayor a 10 m. Antes de cada inmersión se revisa el plan de buceo (tiempos, profundidades y objetivo de la inmersión). Es importante contar con personas líderes en cada operación con completa responsabilidad de la seguridad del resto del equipo de monitoreo (nivel de certificación mínimo PADI Dive Master o equivalente), con la finalidad de asegurar conocimiento básico de primeros auxilios y experiencia en la planeación de inmersiones, así como tomar decisiones ante la responsabilidad de la seguridad del resto del equipo de monitoreo. La organización del equipo y la proporción de equipos de cada embarcación será de acuerdo con el nivel de experiencia (la certificación mínima para participar en el monitoreo será Open Water o su equivalente), capacitación de tripulantes y capacidad de la embarcación. Las inmersiones se realizarán a profundidades menores a los 20 metros (considerando el tiempo que se emplea para desarrollar cada metodología). En todos los buceos se deben de seguir estándares de buceo seguro establecidos por agencias como PADI o equivalentes. Es necesario disponer de un cilindro de oxígeno medicinal con la capacidad suficiente para evacuar en caso de emergencias. Todos los participantes deben conocer el funcionamiento y procedimiento para proveer oxígeno de emergencia. Se debe de contar con plan de evacuación en caso de una emergencia actualizada y con información de la zona o sitios donde se estará realizando el monitoreo submarino. En todos los buceos se deben de seguir estándares de buceo seguro establecidos por agencias internacionales del buceo.

## **Objetivos**

Evaluar los cambios en la riqueza, abundancia, diversidad y biomasa de especies de peces e invertebrados de importancia comercial y ecológica, así como también el evaluar los cambios en la cobertura del fondo marino por componentes bióticos y abióticos; utilizando la metodología de transecto de banda.

## **Materiales y métodos**

Los materiales para efectuar el monitoreo son: equipo básico de buceo (traje acorde con temperatura del agua, aletas, visor, esnórquel y sistema de lastre), computadora, BCD, regulador (con manómetro, profundímetro, brújula y fuente de aire alternativa) y tanque de buceo. Para realizar las técnicas de

monitoreo se necesitan tablas de acrílico, cintas métricas de 30 m largo, lápices de cera, hojas de papel sintético (resistente a agua) con formato respectivo impreso. Las embarcaciones deberán contar con GPS, sistema de comunicación (radio marina o privada, teléfono satelital), además de un kit de herramientas y repuestos básicos para equipo de buceo y embarcación.

Los censos de transecto de banda para peces e invertebrados se realizaron siguiendo la metodología de transecto de banda (Fernandez-Rivera Melo et al., 2012; Hernández-Velasco et al., 2018). Esta metodología consiste en la implementación de transectos de banda donde se identifican y cuentan los invertebrados y peces conspicuos (Fig 1 y Fig 2).



**Figura 1.** Censo de peces.



**Figura 2.** Censo de invertebrados.

### ***Transecto de banda peces***

Los peces se identifican a nivel de especie, se cuentan y se estima el tamaño de todos los individuos que se observan dentro del espacio que comprende una distancia de 2 m a cada lado del transecto (4 m de ancho total), 2 m de altura del fondo a la superficie hasta recorrer los 25 m de cinta. La persona que realiza este censo cuenta con un transecto o cinta métrica la cual se debe de fijar un extremo de la cinta a una roca o estructura, sin causar daños al fondo y vida marina, se nada a una velocidad lenta y constante mientras se desenrolla la cinta, al mismo tiempo que registran las especies y tallas de peces observados. Mientras se nada a lo largo del transecto se puede apuntar todas las especies de peces presentes en el sitio o puede utilizar una lista de especies claves predeterminada. Las tallas deben ser estimadas y registradas al centímetro más cercano para los organismos menores a 20 cm, mientras que los peces que midan más de 20 cm se registran con valores de cada 5 cm.

### ***Transecto de invertebrados***

La composición (riqueza y abundancia) de invertebrados se determina dentro de un transecto de banda de 25 m de largo por 3 m de ancho, al igual que los peces. Durante este censo se realiza una inspección en huecos, grietas y debajo de las cabezas de coral para localizar individuos encuevados. La persona que realiza esta metodología debe de tener buen control de la flotabilidad para no golpear el fondo al estar tan cerca y para no espantar o dañar los organismos de interés y asociados. Al desarrollar esta metodología se deberá nadar lentamente a una velocidad constante.

### ***Cobertura Béntica***

El método que se utiliza es denominado “Punto de contacto uniforme” y consiste en coleccionar tres tipos de datos característicos del hábitat a intervalos fijos de un metro a lo largo de un transecto de 30 m de largo. Los datos coleccionados en cada punto son:

1. Tipo de sustrato: se considera al fondo inerte en donde se llegan a fijar los organismos y se divide en cinco categorías basadas en el tamaño (arena, gravilla, bloque, roca de fondo).
2. Cobertura: porcentaje de espacio cubierto por algas u organismos sésiles. En esta sección se cuenta con categorías que van desde moluscos sésiles, corales, gorgonias y algas.

3. **Relieve:** medida que nos permite cuantificar la elevación del fondo considerando las estructuras que se encuentren en el arrecife o la pendiente del terreno. Este se calcula determinando la altura entre el punto más alto y el más bajo dentro de una caja imaginaria de 1 m x 0.5 m frente a la persona que realiza el censo.

Los sitios de monitoreo deben ser representativos del arrecife rocoso. Una vez que se han seleccionado los sitios a monitorear se debe de realizar el plan de trabajo para la colocación de transectos al azar. La separación entre transectos se recomienda que sea de al menos 5 m de distancia. La disposición de los transectos dependerá de la continuidad del arrecife rocoso. El número de réplicas por sitio dependerá del tamaño del área a evaluar y la cobertura del arrecife rocoso en diferentes profundidades: 5 m, 12 m y 18 m.

### Caso de estudio

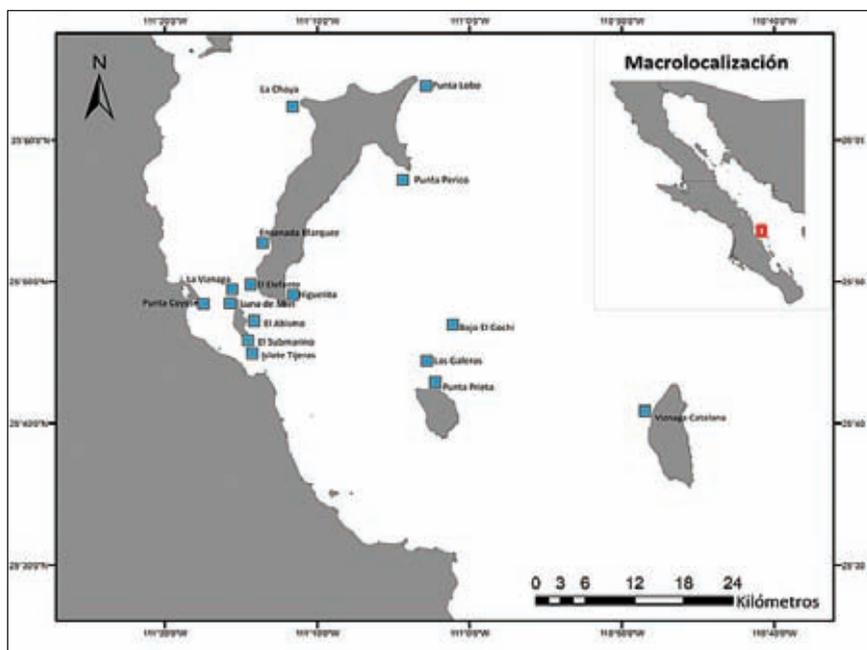


Figura 3. Sitios de monitoreo dentro del PNBL durante campaña 2018.

El Parque Nacional Bahía de Loreto (PNBL) se encuentra localizado en el centro del Golfo de California, fue declarado en 1996 un área natural protegida con el objetivo de regular la actividad pesquera y proteger la diversidad de las islas y sus aguas adyacentes, siendo la participación

ciudadana muy fuerte y una parte fundamental para el funcionamiento de esta. El área incluye 5 islas (Coronados, del Carmen, Danzante, Monserrat y Catalana) y aproximadamente 12 islotes. Los arrecifes rocosos en esta zona son reconocidos por su riqueza biológica. Lo que ha permitido el desarrollo de diversas actividades como la pesca comercial, deportiva y el turismo de naturaleza. El PNBL se encuentra en la región central del Golfo de California siendo esta una de las zonas donde se albergan un número de hábitats marinos, insulares y costeros. Es refugio para un amplio número de especies marinas y terrestres como principales áreas de crianza y alimentación de diversas especies. El presente caso de estudio comprende información recolectada durante la campaña de monitoreo submarino del 2018 en 16 sitios con arrecife rocoso distribuidos a lo largo del PNBL (Fig 3).

Se realizaron 12 transectos para cada una de las metodologías (peces, invertebrados, PCU) a lo largo de 16 sitios del PNBL teniendo un total de 384 transectos (128 peces, 128 invertebrados y 128 PCU). Encontrando que el sitio donde se registró la mayor riqueza de especies fue Punta Prieta, por lo contrario, Luna de Miel fue el sitio donde se registró el menor número de especies.

Si bien el caso de estudio solo muestra los datos con relación a la campaña de monitoreo submarino del 2018, en esta área se han realizado monitoreos desde el 2006 empleando metodologías similares a las descritas anteriormente; donde han participado 12 estudiantes, 15 pescadoras y pescadores, 4 tomadores de decisión, consolidando un grupo de monitoreo submarino dentro del PNBL. Entre 2006 y 2018 se realizaron un total de 3,647 transectos (1,871 y 1,776 transectos de invertebrados y peces, respectivamente). En total, se registraron 58,511 individuos de invertebrados pertenecientes a 45 especies, 42 géneros y 32 familias. La familia *Ophiasteridae* fue la más representada con cinco especies. Se identificaron un total de 377,883 individuos de peces pertenecientes a 130 especies, 86 géneros y 45 familias. Las familias mayormente representadas son la *Serranidae* y *Labridae*, con 10 y 9 especies respectivamente.

## Recomendaciones

Generar información con la misma metodología permite realizar comparaciones del estado de conservación en el ANP y sitios fuera del área protegida.

Consolidar un grupo de monitoreo submarino integrado por personas de la comunidad donde participen hombres y mujeres y personas de diferentes rangos de edad.

Complementar las evaluaciones submarinas biológicas apoyándose de información ambiental (temperatura, oxígeno disuelto) y estableciendo a la par de este monitoreo un monitoreo oceanográfico.

El diseño de un programa de monitoreo en colaboración con academia, sociedad civil, comunidades costeras y tomadores de decisión ayuda a la gobernanza.

Todo monitoreo de arrecifes rocosos deberá tomar en cuenta los siguientes puntos: recursos económicos disponibles, temporalidades, plazo de ejecución, objetivos del monitoreo, recursos pesqueros, indicadores biológicos, tratamientos estadísticos a utilizar que se alinean con su objetivo o con los indicadores a evaluar, además de aplicar criterios adecuados para la selección de sitios de monitoreo.

### Material complementario

<https://costasalvaje.org/wp-content/uploads/2021/07/Estado-de-conservacion-de-corales.pdf>

### Bibliografía citada

1. AAUS. Standards for scientific diving, certification and operation of scientific diving programs. 2003
2. Brusca, R. C. y M. E. Hendrickx. Invertebrate biodiversity and conservation in the Gulf of California. En: R. C. Brusca (ed.). The Gulf of California: Biodiversity and Conservation. ASDM Studies in Natural History. Arizona-Sonora Desert Museum Press y University of Arizona Press, Tucson, pp. 72-95. (2010)
3. Hastings, P. A., L. T. Findley y A. M. Van der Heiden. Fishes of the Gulf of California. In The Gulf of California. Biodiversity and Conservation, R. Brusca (ed.). University of Arizona Press, Tucson. p. 96-118 (2010)
4. Hernández-Velasco, A, et al. Protocolo de Monitoreo para reservas marinas. Comunidad y Biodiversidad A.C., Guaymas, Sonora. (2018)
5. Cudney-Bueno, R. y Turk-Boyer, P. J. 1998. Pescando entre mareas del Alto Golfo de California. Centro Intercultural de Estudios de Desiertos y Océanos, Sonora, México.
6. Pauly, D. 1984. Fish population dynamics in tropical waters; a manual for use with programmable calculators. ICLARM Studies Review (8):325 p
7. Fernández-Rivera Melo, F.J., et al. Protocolo de Monitoreo para reservas marinas del Golfo de California. Comunidad y Biodiversidad A.C., Guaymas Sonora. (2012)



## Técnicas de monitoreo del bosque de sargazo gigante, México

---

Arturo Hernández Velasco\*  
Alfonso Romero Castro\*  
Raziel Hernández Pimienta\*

---

Los bosques de sargazo gigante son ecosistemas formados por algas pardas del orden de las Laminariales. En México, la especie dominante es *Macrocystis pyrifera* también conocida como “kelp” gigante o sargazo gigante y en algunos casos por buleras o bule (*Pelagophycus porra*), boa de plumas (*Egregia menziesii*) o palmitos (*Ecklonia arborea*) (Hernández-Velasco *et al* 2018). Estos ecosistemas proveen protección y alimento a más de 800 especies de peces, invertebrados, aves, mamíferos marinos y otras algas. Siendo sitios de alta importancia para comunidades costeras ya que en ellos habitan especies de alto valor comercial (Hernández-Velasco *et al* 2018, Shuman, 2010).

El monitoreo de biodiversidad y composición en los bosques de sargazo gigante se ha utilizado para muchos fines dependiendo de los objetivos de interés (Shuman,2010). En este caso, la técnica es utilizada para evaluar la salud de este ecosistema y de las poblaciones de organismos marinos que habitan dentro del mismo. Es importante contar con indicadores que puedan proveer información relevante del estado actual del ecosistema y que puedan ser detectados a través del monitoreo a largo plazo cambios que en él se presenten. La información que se obtiene en el monitoreo permite conocer el estado actual al momento del monitoreo, a través de las interacciones entre las especies y la estructura comunitaria, incluyendo elementos bióticos y físicos del ecosistema.

---

\* Comunidad y Biodiversidad A.C., calle isla del peruano #215, col Lomas de miramar, guaymas Sonora cp 85448, México.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Es necesario contar con certificación mínima “Open Water Diver” (PADI o equivalente) con al menos 20 buceos registrados en bitácora en ese ecosistema, debido a la complejidad y posible estrés por bucear entre el sargazo gigante. Las personas líderes de campaña de monitoreo deberán de contar con nivel de liderazgo Dive Master, tres estrellas o equivalente, para asegurar conocimiento básico de primeros auxilios y experiencia en la planeación de inmersiones, así como tomar decisiones ante la responsabilidad de la seguridad del resto de los buceadores.

Previamente consultar tabla de mareas y condiciones climáticas del sitio a monitorear, para planificar inmersiones contemplando corriente, oleaje, visibilidad y complejidad del sitio. Los buceos se realizan en parejas o grupos con una separación de no más de 10 m de distancia entre cada uno ellos y deben evitar bucear a profundidades mayores a 20 metros. Es importante llevar una boya tipo “SCUBA tuba” para señalar su ubicación en superficie, además de facilitar la ubicación de la pareja para subir a la embarcación.

Importante disponer de un cilindro de oxígeno medicinal con la capacidad suficiente para evacuar en caso de emergencias. Todos los participantes deben conocer el funcionamiento y procedimiento para proveer oxígeno de emergencia. En todos los buceos seguir estándares de seguridad definidos por organizaciones internacionales.

## **Objetivos**

Valorar cambios en la riqueza, distribución, biomasa y abundancia de especies de peces e invertebrados de importancia comercial y ecológica, así como también el valorar cambios en la cobertura del fondo marino por componentes bióticos y abióticos dentro del bosque de sargazo gigante.

## **Materiales y métodos**

Para realizar los buceos se necesita equipo básico de buceo (traje acorde con temperatura del agua, aletas, visor, esnórquel y sistema de lastre), computadora, BCD, regulador (con manómetro, profundímetro, brújula y fuente de aire alternativa) y tanque de buceo. Para realizar las técnicas de monitoreo se necesita tabla de acrílico, cintas métricas de 30 m de largo, lápices de cera, hojas de papel polyester (impermeable al agua) impresas con formato respectivo, caliper o pie de rey. Las embarcaciones deberán contar con GPS, sistema de comunicación (radio marina o privada, teléfono celular y/o satelital),

además de un kit de herramientas y repuestos básicos para equipo de buceo y embarcación.

### *Transecto de banda peces*

Visualmente se identifican, cuentan y se estima el tamaño de todos los individuos de especies de peces que se observan dentro del transecto de banda en un espacio que comprende una distancia de 1 m a cada lado del transecto (2 m de ancho) y aproximadamente 2 m hacia el frente (largo del túnel imaginario) hasta recorrer los 30 m. Se nada a una velocidad constante, recorriendo el transecto entre 6 y 10 minutos para registrar todas las especies de peces presentes de una lista predeterminada. Las tallas deben ser registradas al centímetro más cercano para los organismos menores a 20 cm, los peces que midan más de 20 cm el intervalo será cada 5 cm.

### *Transecto de banda de invertebrados*

Para el desarrollo de esta metodología se nada despegado del fondo no más de 30 cm a largo de un transecto de banda de 2 m de ancho por 30 m de largo, registrando especie y abundancia de todas las especies de macroinvertebrados de importancia ecológica y comercial presentes en el sitio. Durante este censo se debe de realizar una búsqueda minuciosa en todos los sitios donde pudiesen habitar macroinvertebrados (p.ej. huecos, grietas, corales, debajo de cuevas) para localizar individuos. Se debe de tener un buen control de flotabilidad para no golpear el fondo marino.

### *Cobertura béntica*

El monitoreo del fondo se realiza mediante el método “Punto de Contacto Uniforme (PCU)”, consiste en coleccionar tres tipos de datos del hábitat, a intervalos fijos de un metro a lo largo de un transecto de 30 m de largo, teniendo al final 90 registros en cada transecto (30 de sustrato, 30 de cobertura y 30 de relieve).

1. Tipo de sustrato: esta variable se relaciona al tipo de fondo inerte en donde se llegan a fijar los organismos. La cual se divide en cinco categorías basadas en el tamaño (arena: partículas menores de 0.5 cm, gravilla: rocas entre 0.5 cm -15 cm, bloque: rocas entre 15 cm - 1 m, roca de fondo: rocas mayores de 1 m y otro: restos de conchas marinas, metales, etc.).
2. Cobertura: esta variable se refiere a lo que cubre el sustrato, las categorías van desde moluscos sésiles, corales, gorgonias hasta algas. Dichas

categorías tendrán que definirse en relación con las algas, invertebrados que habitan en los bosques de kel a censar.

3. Relieve: esta variable se refiere a la rugosidad o pendiente del sitio, la cual se calcula determinando la altura entre el punto más alto y el más bajo dentro de una caja imaginaria de 1 m x 0.5 m frente al buzo. Se utilizan cuatro categorías para clasificar el relieve (Categoría 1: 0 - 10 cm, Categoría 2: 10 cm - 1 m, Categoría 3: 1 m - 2 m y Categoría 4: > 2 m).

### ***Cobertura de algas***

El censo de algas consta de nadar sobre el transecto lineal que comprende una distancia de 1m a cada lado del transecto (2 m de ancho), hasta recorrer los 30 m de transecto, identificando y estimando abundancias de diversas especies de algas. Para esta metodología se identifican y se cuenta el número de estipes (“tallos o guías”) de todos los individuos de especies de *Macrocystis pyrifera* y se cuenta la abundancia de *Ecklonia arborea*. Para el conteo de estipes de *M. pyrifera* se deberán estimar dichos estipes de cada organismo un metro arriba del fondo que se encuentren sujetas. Durante todo el censo se deberán registrar especies de algas invasoras reportando únicamente como presentes o ausentes.

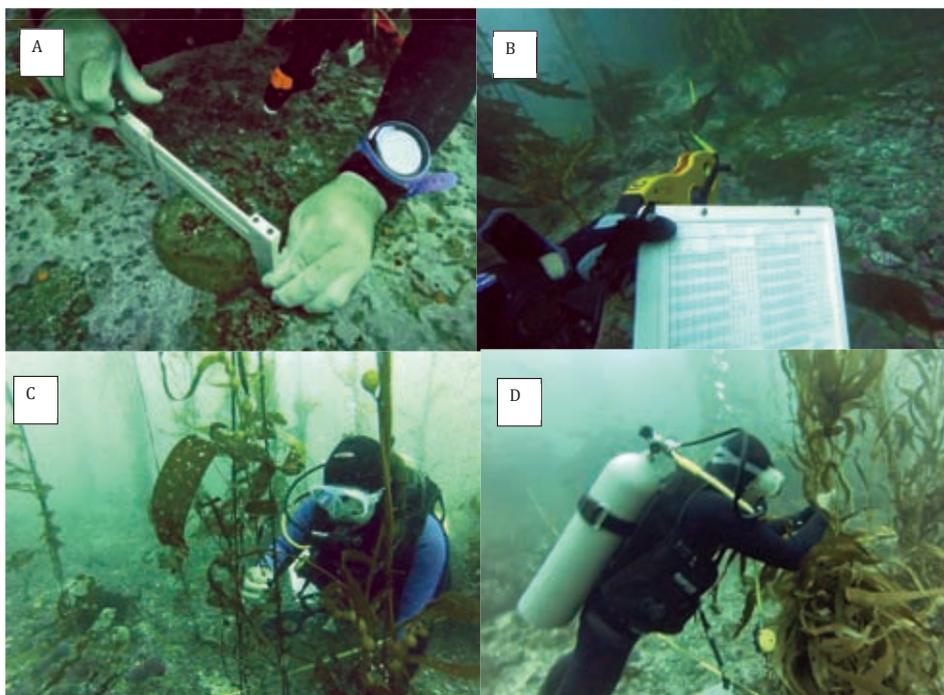
El conteo de guías de *M. pyrifera* se realiza con los dedos, cuando el bosque es muy denso se recomienda realizar conteos por puñados, contando el número de guías que caben en un “puñado” y entonces contar el número de puñados.

Se recomienda realizar todas las metodologías sobre la misma línea de banda (transecto desplegado en el sitio) con la finalidad de contar por sitio con 16 transectos de los censos de peces, invertebrados, algas y PCU, los cuales, posteriormente, se pueden relacionar. Se recomienda desplegar dichos transectos en al menos tres estratos de profundidad (5 m, 12 m y 18 m). Durante estos censos se nada a velocidad constante para terminar cada transecto en un tiempo de 8 a 10 minutos. Mientras despliega el transecto inicial se realiza el censo de peces, sobre el mismo transecto o de regreso (dirección contraria de censo de peces) se realiza el conteo de invertebrados, posteriormente algas y finalmente el censo de cobertura béntica.

### ***Censo visual de Abulón***

Una pareja de personas recorre el sitio buscando abulones en las cuevas y oquedades de las rocas, nadando a una distancia no mayor a 1 m del fondo por un tiempo determinado (60 minutos). Se cuenta el número de abulones

y se registra la especie, talla de cada abulón con un pie de rey o caliper, la abundancia y frecuencia de tallas de cada agregación reproductiva; contando el tiempo transcurrido entre cada observación de agregaciones. Para que se considere una agregación la distancia entre abulón y abulón no deberá de exceder del metro de distancia entre ellos. Es importante que se haga el muestreo desde los 18 m hasta la zona más somera ya que las especies de abulones presentan una distribución vertical muy marcada. Se debe de registrar la dirección o rumbo en la que nadaron (Fig 1) y el tiempo empleado en encontrar cada abulón. Se realizan un total de 8 búsquedas en cada sitio, en dos rangos de profundidad 18 m -10 m (4 réplicas) 9 m - 2 m (4 réplicas) los equipos de búsqueda deben de nadar siempre en la misma dirección siguiendo el estrato de mayor a menor profundidad.



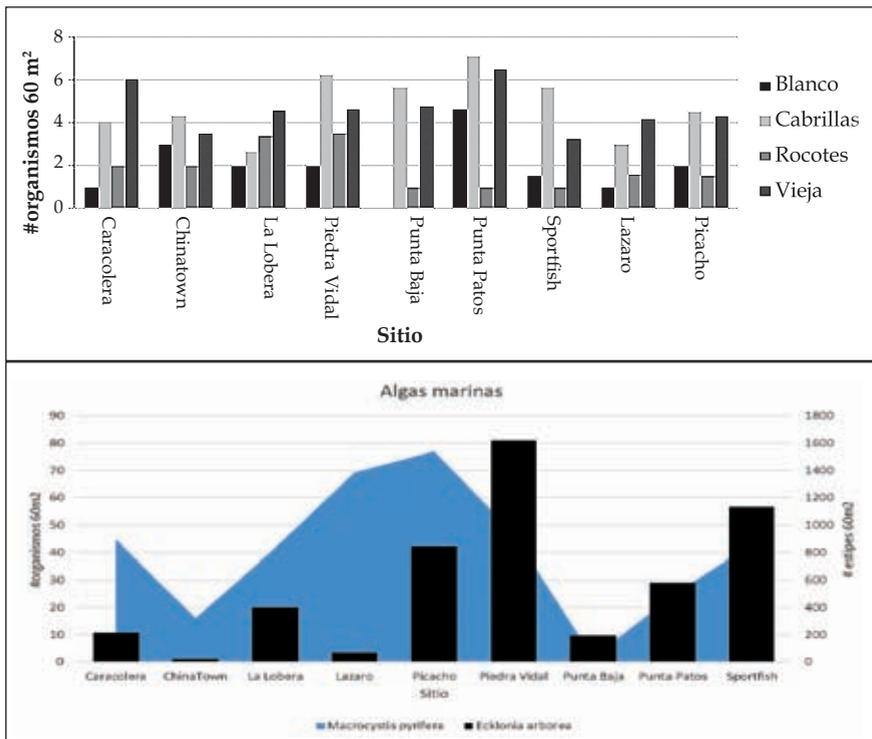
**Figura 1.** A) medición de abulón con caliper. B) transecto de Punto Contacto Uniforme, C y D) Conteo de talos de *Macrocyctis pyrifera*.

### Caso de estudio

*Monitoreo de ecosistema de sargazo gigante en Isla San Jerónimo, Baja California, México*

En agosto de 2018 se llevó a cabo el monitoreo submarino de los arrecifes de la Isla San Jerónimo (Sport Fish, China Town, Punta Patos, La Lobera y Piedra Vidal) y arrecifes adyacentes (Caracolera, Punta Baja, Picacho y Lázaro).

Resultado de los censos realizados con la metodología de transecto de banda de peces (30m x 2m x 2m), se lograron contabilizar un total de 4,024 peces en total. Registrando las mayores abundancias de peces en Punta Patos y Piedra Vidal, en comparación con Punta Baja. Respecto a los valores de riqueza específica de cada sitio. Se observó que los sitios con mayor número de especies fueron los arrecifes de La Lobera y Lázaro. En conjunto los sitios que se monitorearon alrededor de la isla San Jerónimo sumaron una mayor abundancia y riqueza en comparación a los sitios adyacentes a la isla.



**Figura 2.** A) Abundancia de especies de peces comerciales por sitio de monitoreo, B) abundancia de *Ecklonia arborea* y *Macrosystis pyrifera* en los arrecifes de la isla San Jerónimo y sitios adyacentes.

Para el análisis de abundancia de especies de peces se agruparon por grupos de peces de importancia comercial. Las categorías fueron: blanco (*Caulolatilus princeps*), cabrillas (*Paralabrax clathratus*, *P. nebulifer*), rocotes (*Sebastes auriculatus*, *S. carnatus*, *S. chrysomelas*, *S. rastrelliger*, *S. serranoides*) y viejas (*Semicossyphus pulcher*).

Referente a los análisis de abundancia y riqueza de especies de invertebrados se encontró que el sitio que presentó la mayor riqueza fue Punta Patos en comparación con la Caracolera y ChinaTown que fueron donde se registró el menor número de especies. A su vez los sitios donde se presentaron mayores abundancias fueron Picacho y la Caracolera. Por el contrario, en los arrecifes de Punta Baja y SportFish las abundancias de invertebrados fueron menores.

Finalmente, en el análisis relacionado a las algas marinas, se evaluó la cobertura *M. pyrifera* con el indicador de número de estipes (talos) en cada uno de los sitios muestreados, siendo el Picacho y el Lázaro los sitios donde se presentaron las mayores abundancias en el número de estipes. En contraste la mayor abundancia de coliflor (*Ecklonia arborea*) fue encontrada en los arrecifes de Piedra Vidal y Sportfish.

## Recomendaciones

Para este ecosistema es importante que los buzos tengan experiencia y sean capaces de mantener la calma, debido a que son usuales los enredos o la dificultad para avanzar entre los estipes del sargazo gigante. En ocasiones la visibilidad puede cambiar conforme se adentran al bosque de sargazo gigante.

Las personas que buscan abulón deben tener experiencia en la búsqueda e identificación de organismos, con esto se disminuye el sesgo en el esfuerzo de búsqueda (tiempo), así como también deben de contar con un excelente sentido de orientación para no contar nuevamente los mismos organismos.

El monitoreo de estos ecosistemas se debe acompañar con otras metodologías como el monitoreo oceanográfico, ya que se ha visto que este ecosistema es muy susceptible a cambios ambientales como el aumento de temperatura y baja en oxígeno.

Previo a cada campaña de monitoreo submarino del bosque de sargazo gigante, los participantes deben contar con capacitación y recordatorios de las técnicas de monitoreo empleadas para dicha campaña de monitoreo.

Los grupos de monitoreo se recomienda que sean multisectoriales y mixtos donde hombres y mujeres participen de manera complementaria, aportando

conocimientos y habilidades que fortalezcan dicha campaña de monitoreo submarino.

Se deberán de tomar en cuenta los siguientes puntos al momento de diseñar y planificar las campañas de monitoreo en el bosque de sargazo gigante: recursos económicos disponibles, temporalidades, plazo de ejecución, objetivos del monitoreo, recursos pesqueros disponibles en los sitios, indicadores biológicos, tratamientos estadísticos a utilizar que se alinean con su objetivo o con los indicadores a evaluar, además de aplicar criterios adecuados para la selección de sitios de monitoreo.

### **Información suplementaria**

Protocolo de Monitoreo para Reservas Marinas - México 2018

[https://www.researchgate.net/publication/326187362\\_Protocolo\\_de\\_Monitoreo\\_para\\_Reservas\\_Marinas\\_-\\_Mexico\\_2018](https://www.researchgate.net/publication/326187362_Protocolo_de_Monitoreo_para_Reservas_Marinas_-_Mexico_2018)

### **Bibliografía**

Hernández-Velasco A., et al. Los bosques sumergidos en México. *Biodiversitas* 137: 2-6. (2018).

Shuman, C. Manual de instrucción Reef Check California: Guía para el monitoreo del bosque de Sargazo en la península de Baja California. Reef Check Foundation, Pacific Palisades, CA, USA. (2010).

## Revisión sobre censos preliminares de peces mediante buceo autónomo en lagos volcánicos de El Salvador

---

José Enrique Barraza\*  
Edgardo Ochoa\*\*

---

La región centroamericana contiene muchos lagos de diferentes profundidades, asociados a procesos volcánicos<sup>1</sup>. En estos cuerpos de agua habita una importante biodiversidad que incluye especies de peces endémicos regionales o nacionales para Guatemala<sup>2</sup>, Honduras<sup>3</sup>, El Salvador<sup>4</sup>, Nicaragua<sup>5</sup> y Costa Rica<sup>6</sup>. Este endemismo está asociado principalmente a la deriva causada por los drenajes hídricos y relieves montañosos de esta zona<sup>7</sup>.

Las principales familias de peces continentales presentes en lagos centroamericanos y áreas aledañas y que ocurren en diferentes hábitats, son: *Ariidae*, *Atherinidae*, *Cichlidae*, *Characidae*, *Heptapteridae* y *Poecilidae*<sup>7</sup>, entre otras.

Los diferentes estudios realizados en la región han utilizado diferentes metodologías mediante diferentes artes de pesca y pesca eléctrica. Sin embargo, en lugares con un fondo con pendiente importante o con profundidades superiores a 2 metros, se requiere otro tipo de metodología que permita documentar las abundancias de especies de peces presentes, incluyendo otros datos que solo se pueden observar bajo el agua como: distribución de hábitats preferidos y vegetación en un gradiente de profundidad.

Este documento analiza la metodología que se ha utilizado recientemente en censos subacuáticos de la ictiofauna asociada a fondos rocosos de lagos volcánicos utilizando buceo autónomo en Nicaragua<sup>8</sup> y El Salvador<sup>9</sup>, así como comparar con otros censos similares en otras partes del mundo.

---

\* Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador, El Salvador. Correo: jose.barraza@ambiente.gob.sv

\*\* Conservation International. Arlington, Va. EUA. Correo: eochoa@conservation.org

## Materiales y métodos

Para realizar exitosamente las maniobras de buceo en los lagos de Coatepeque e Ilopango en El Salvador<sup>9,10</sup>, se requirió implementar protocolos de buceo en aguas abiertas, utilizando equipos convencionales de circuito abierto (SCUBA), tomando todas las precauciones para minimizar los riesgos inherentes a la actividad, siguiendo estrictamente el plan de buceo establecido de acuerdo a los objetivos científicos y el nivel de entrenamiento de los buzos participantes. Se incluyó un bote cercano a la zona.

Se establecieron transectos rectos de 50 por 2 m de ancho a profundidades de 4 y 9 m aproximadamente en los que se realizaba un registro de abundancia de peces en forma visual. Este monitoreo de peces incluye la combinación de 2 técnicas. La primera detecta las diferencias en el conjunto de peces en los diferentes sitios. Esto provee datos iniciales de zonificación y en su caso, manejo y monitoreo de los recursos<sup>11</sup>. La segunda técnica hace un conteo de peces individuales por especie y se estiman sus tallas. Al concluir el transecto se realizaba la misma actividad a 180 grados. Estas maniobras se realizaron con luz de día entre las 7:30 a 11:30 a.m. En el lago de Coatepeque se completaron 12 censos entre diciembre de 2015 a abril de 2016 y en el otro cuerpo de agua, se realizaron 8 censos entre diciembre de 2018 a marzo de 2019. En caso de existir dificultad para distinguir a los juveniles de *Parachromis*, se descartaron esos individuos del censo. Similar metodología se implementó para censos de peces con énfasis en el género *Amphilophus* en lagos volcánicos de Nicaragua<sup>8</sup>.

### Caso de Estudio

#### *Resultados preliminares en el Lago Coatepeque*

Las visibilidades oscilaron entre 2 a 8 m aproximadamente, lo que permitió realizar la actividad con facilidad en la mayoría de los casos. Los peces más abundantes en el lago de Coatepeque fueron: *Parachromis motaguensis*, *Parachromis managuensis* y *Amatitlania nigrofasciata* (44.0, 32.4, 15.0%, respectivamente)<sup>9</sup>. Esta última presentó un amplio dominio numérico (97.4%, figura 1) en el lago de Ilopango, así como en menor proporción, *Astatheros macracanthus* (0.5%) y *Cichlasoma trimaculatum* (0.4%). Las abundancias antes mencionadas reflejan que cada ecosistema acuático presenta su propia composición y distribución de especies. Al comparar la composición y abundancia de especies del estrato superior y el inferior establecidos (4 y 9 m aproximados, respectivamente), se determinó que eran similares<sup>10</sup>.



**Figura 1.** *A. nigrofasciata* en zona de peñascos volcánicos. Lago de Ilopango, 4 m de profundidad.

Esta metodología utilizada presenta limitaciones para incluir las diferentes especies en sus respectivos hábitats, por ello, se presenta la tabla 1, considerando la investigación de McMahan y colaboradores <sup>4</sup>.

**Tabla 1.** Especies excluidas por el tipo de censo de conteo de peces utilizado. LC: lago de Coatepeque, LI: lago de Ilopango. X: presente.

Especie	LI	Hábitat
<i>Atherinella</i> spp.	X	Superficie (0-1 m).
<i>Oreochromis niloticus</i>	X	Próxima a o entre vegetación sumergida (0-10 m).
<i>Poecilia</i> spp.	X	Cerca de la orilla y superficial (0-2 m).
<i>Poeciliopsis pleurospilus</i>	¿?	Igual a la anterior.
<i>Rhamdia</i> spp.	X	Sobre diferentes tipos de fondos (5-10 m ¿?).
<i>Synbranchus marmoratus</i>	¿?	En madrigueras en sedimento y entre rocas (5 m-¿?).
<i>Vieja guttulata</i>	-	Adultos cerca o dentro de espacios en los peñascos. Juveniles a veces están cerca de la superficie.

También existen dificultades en la época lluviosa en el lago de Ilopango debido a que se incrementa la abundancia de fitoplancton<sup>12</sup>, en una franja que desde la superficie mide 20 - 30 metros hacia abajo, aproximadamente. En el otro cuerpo de agua la visibilidad disminuye a 2 - 4 metros aproximadamente en el mismo período por la misma circunstancia y otras no determinadas. Otra limitación de este estudio fue la limitada cobertura geográfica y el período de muestreo.

## Recomendaciones

Se propone como recomendación la ampliación de estaciones de monitoreo y explorar la inclusión de la época lluviosa con otras metodologías.

## Bibliografía

1. Bergoeing, JP. *Geomorphology of Central America. A Synegetic Perspective*. Amsterdam: Elsevier; 2015.
2. Méndez, A, García, ME, Lozano L. Sistemática del pez *Petenia splendida* (Perciformes: Cichlidae) en el lago Petén Itzá, Guatemala. *Rev. Biol. Trop.* 2011; 59 (3), 1205-1216.
3. Matamoros, WA, Schaeffer, JF, Kreiser BR. Annotated checklist of the freshwater fishes of continental and insular Honduras. *Zootaxa*. 2009; 2307, 1-38.
4. McMahan, CD *et al.* Checklist of the inland fishes of El Salvador. *Zootaxa*. 2013; 3608, 440-456.
5. Elmer, KR *et al.* Rapid sympatric ecological differentiation of crater cichlid fishes within historic times. *BMC Biology*. 2010; 8. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-8-60>
6. Angulo, A, Garita-Alvarado, CA, Bussing, WA, López, MI. Annotated checklist of the freshwater fishes of continental and insular Costa Rica: Additions and nomenclatural revisions. *Check List*. 2013; 9, 897-1019.
7. Matamoros, WA *et al.* Derivation of the freshwater fish fauna of Central America revisited: Myer's hypothesis in the twenty-first century. *Cladistics*. 2014; 31, 1-12.
8. Dittmann, MT *et al.* Depth-dependent abundance of Micas Cichlid fish (*Amphilophus* spp.) in tow Nicaraguan crater lakes. *Hydrobiologia*. 2012; 686, 277-285.
9. Barraza, J.E. Censo de peces mediante buceo en el lago de Coatepeque, El Salvador. XV Congreso Nacional de Ictiología, V Simposio Latinoamericano de Ictiología, I Simposio Internacional de Genómica de Peces (FIGIS). 2016 Nov 14-18; Aguas Calientes, México. Compendio de Resúmenes Orales y Carteles, 2016. p. 82.

10. Barraza, JE, Melara, VE. Censo subacuático preliminar de peces asociados a fondos rocosos en el lago de Ilopango. *Realidad & Reflexión*. 2020; 51, 13-24.
11. English, S, Wilkinson, C, Baker, V. *Survey Manual for Tropical Marine Resources*. 2<sup>nd</sup> edition. Australian Institute of Marine Sciences; 1997.
12. Gophen, M., Walline, PD. The limnology of Lake Ilopango, *Verh. Internat. Verein. Limnol.* El Salvador. 2005; 29-799-801.



## Profundizando en el conocimiento de la biodiversidad marina al norte del pacífico costarricense: alcances del buceo científico en el proyecto BioMar-ACG

---

José Leonardo Chacón-Monge <sup>1,2,3</sup>

Sebastián Mena <sup>1,2</sup>

Gilberth Ampié-Cruz <sup>4</sup>

Arturo Angulo <sup>1,3</sup>

Beatriz Naranjo-Elizondo <sup>1,5</sup>

Odalisca Breedy <sup>1,3,5,6</sup>

Carolina Sheridan-Rodríguez <sup>1,2,3</sup>

Jorge Cortés <sup>1,2,3</sup>

---

### Introducción

El estado de conservación o vulnerabilidad de un área puede inferirse de la riqueza y abundancia relativa de especies presente en ella. Al conocer la composición de especies de un sitio, es posible establecer parámetros comparativos, históricos y biogeográficos. Relevantes en el manejo y la conservación de los recursos. El monitoreo y registro del estado de las especies, mediante datos poblacionales en un inventario ecológico/taxonómico, permite evidenciar el cambio/estabilidad de las comunidades en el tiempo. Así como el efecto de variaciones ambientales y agentes estresores (naturales o antrópicos) sobre ellas<sup>34</sup>.

- 
1. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica, San Pedro, 11501-2060, San José, Costa Rica; jose.chaconmonge@ucr.ac.cr
  2. Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 11501-2060, San José, Costa Rica
  3. Museo de Zoología, Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical (CIBET), Universidad de Costa Rica, San Pedro, 11501-2060, San José, Costa Rica
  4. BioMar-ACG, CIMAR-GDFCF-ACG, Guanacaste, Costa Rica
  5. Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMIC), Universidad de Costa Rica, San Pedro, 11501-2060, San José, Costa Rica
  6. Smithsonian Tropical Research Institute, Ciudad de Panamá, República de Panamá

Con el proyecto BioMar-ACG, instituciones estatales, investigadores y el sector privado establecieron una plataforma efectiva para el estudio sistemático de la diversidad marina del Área de Conservación Guanacaste (ACG) <sup>1</sup>. Las metodologías de recolecta y análisis de datos involucran herramientas que pueden ser utilizadas en investigaciones de taxonomía básica e integrativa, sistemática molecular, historia natural, ecología y evolución <sup>2-8</sup>. Además, la inclusión de la población civil, comunidades costeras y parataxónomos locales en programas de ciencia ciudadana, permiten un nuevo abordaje del estudio de la diversidad y la conservación, en paralelo a la activación socioeconómica desde el biodesarrollo y la educación ambiental <sup>9-11</sup>.

El estudio de la diversidad marina en el ACG inició hace 90 años, enfocado en fondos blandos y planicies de sedimentos, con dragas y redes de arrastre como herramientas principales para el muestreo <sup>12</sup>. A pesar de la ventaja en el alcance batimétrico, dichas prácticas comprometen la integridad de las muestras y la salud del lecho marino. La tecnificación de herramientas y la capacitación de buzos locales han permitido alcanzar otros ambientes y comunidades biológicas distintas. Con la obtención de muestras de alta calidad y valor taxonómico se ha aumentado considerablemente el número de especies registradas (de 594 a > 1500) en pocos años <sup>3,5-9,12,13</sup>.

El Sector Marino del ACG, es uno de los sitios más diversos y estudiados de Costa Rica <sup>1</sup>. Alberga más de un tercio de las especies marinas reportadas en el Pacífico costarricense, siendo comparable en riqueza con áreas conocidas por su alta diversidad en el Pacífico Tropical Oriental (PTO), pero de mucha mayor extensión <sup>14</sup>. El proyecto BioMar-ACG permite el estudio integral de las especies, con Vouchers depositados en el Museo de Zoología (MZUCR-CIBET) /Herbario (USJ-CIBET) de la Universidad de Costa Rica y registros en las bases de datos del proyecto de secuenciación molecular BOLD, únicos para algunas especies. Se espera que dicha plataforma, facilite la legislación informada (conservación, gestión y uso) de los recursos naturales <sup>22-27</sup>.

El proyecto BioMar-ACG reúne la infraestructura y el conocimiento técnico para la obtención de datos de alta calidad e importancia regional. En la mayoría de los casos, el buceo científico es una herramienta indispensable para su alcance. Sin embargo, las metodologías y técnicas de tales esfuerzos suelen pasar desapercibidas por los usuarios finales de la información y personas fuera del proyecto. Al tiempo que la actualización y acreditación de capacidades técnicas se vuelven más necesarias.

## Objetivos

Sintetizar las principales técnicas de muestreo para el estudio de la diversidad marina utilizadas en el proyecto BioMar-ACG, haciendo énfasis en el buceo científico como herramienta principal. Se discuten los alcances y limitaciones más importantes de esta actividad durante el periodo 2015-2021. A partir de experiencias colaborativas entre investigadores y el equipo de buceo científico del proyecto. De manera complementaria, se analizan y discuten otras técnicas, tecnologías y métodos utilizados en proyectos afines en el ACG, que dependen del buceo para la obtención de datos. Concluimos con algunas recomendaciones para la mejora de esta actividad en el proyecto.

## Procedimientos mínimos de seguridad

Previamente se evalúan las condiciones meteorológicas y se definen los sitios/ambientes a explorar, se plantean rutas y estrategias de cobertura de fondo en el muestreo. En cada punto, se determina la profundidad máxima explorable bajo los límites de seguridad y la experiencia del equipo. Se verifican y anotan las coordenadas, eligiendo una dirección cardinal a seguir durante el recorrido como transecto o área de trabajo, según sea el caso. Se entra al agua, en orden y verificando la seguridad del buzo en superficie.

Los buceos inician en la proa de la embarcación, idealmente apoyándose del cabo del ancla para descender, sobre todo durante inmersiones profundas. Al llegar al fondo, el equipo de buzos verifica su estado, mantiene contacto visual e inicia el recorrido planeado, considerando las condiciones del entorno y la seguridad individual. Constantemente se revisa el volumen de aire en el tanque y la ubicación de los demás compañeros. A más de 30 m y en condiciones de baja visibilidad, se exploran únicamente las áreas cercanas al ancla, ya que se utiliza el cabo para el ascenso. Siempre se realizan paradas de seguridad cada 10 m, respetando los periodos mínimos de descanso en superficie entre inmersiones.

## Materiales y métodos

### *Recolección de especímenes mediante buceo científico*

#### *Generalidades*

Las profundidades exploradas van de 0 - 45 m, con tiempos de inmersión promedio de 50 minutos. En la mayoría de los casos participan 3 o más buzos. La entrada al agua es por lo general desde una embarcación ubicada en las

cercanías del área de estudio/trabajo seleccionada. Las tareas individuales durante la inmersión son asignadas previamente, tanto el equipo de apoyo en superficie como el equipo de buzos conocen sus responsabilidades. Bajo el agua, se realizan búsquedas exhaustivas para la recolecta directa en distintos hábitats, según el grupo taxonómico o gremio ecológico correspondiente.

Cuando es posible, antes de manipular los ejemplares se fotografían en su estado natural. Las herramientas para la captura o el desprendimiento del sustrato varían dependiendo del tipo de organismo. Las muestras se depositan en bolsas transparentes con cierre hermético, frascos plásticos con tapa de rosca, bolsas de tela o malla. Dependiendo de cada gremio, se separan los depredadores y cánibales del resto o se clasifican por sus características morfológicas y/o grado de fragilidad. Durante el muestreo, los organismos se trasladan en redes de pesca de mano. En superficie, se mantienen en contenedores con agua de mar, usualmente aireados y a la sombra o con bolsas llenas de hielo. En la búsqueda de especies de hábito críptico se frecuenta el uso de linternas submarinas, al igual que en zonas de alta turbidez y poca visibilidad.

### ***Organismos sésiles, sedentarios-bentónicos***

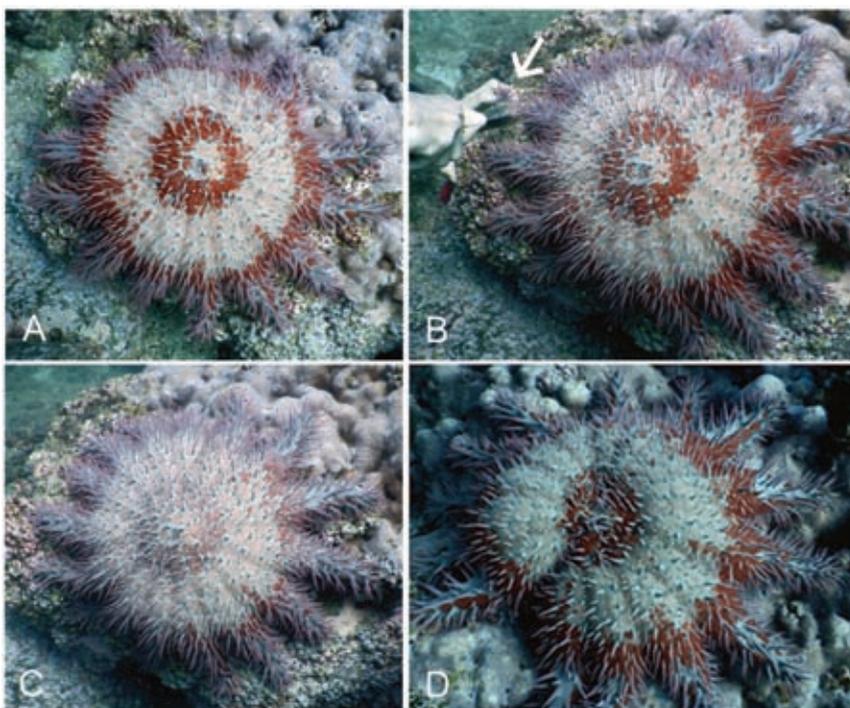
En el fondo se buscan epibiontes, se levantan algunas rocas y se mueve el sustrato entre las algas o los intersticios bentónicos, para buscar organismos asociados a dichos sustratos. Todo esto intentando perturbar al mínimo el entorno y devolviendo las rocas removidas a su posición original. Los organismos sésiles, se desprenden de la superficie con las manos o con el uso de alguna herramienta que lo facilite. Los organismos acrescentes como esponjas, pólipos de cnidarios (en general), algas o rodolitos se fragmentan con el fin de recolectar una muestra para su identificación morfológica y molecular, evaluando la presencia de posible fauna asociada. Se extraen rocas, sedimentos y/o algas, para realizar lavados, remotes o fragmentación del material y extraer los organismos en el laboratorio.

### ***Organismos de mayor movilidad***

Los peces, por ejemplo, son capturados con redes, succionadoras o arpones de mano y se transportan en bolsas de tela o malla. En el caso de especies de hábito críptico, tras ser ubicadas en el sustrato, se exponen a una solución anestésica (eugenol). Que es liberada gradual y localmente por medio del uso de recipientes con cierre hermético. Una vez anestesiados, los ejemplares de interés se recolectan manualmente o con succionadoras de tubo.

### *Muestreo no letal*

Ocasionalmente, debido a la rareza (vulnerabilidad), talla/longevidad y estado de gravidez/madurez de algunos organismos, se decide no recolectar el ejemplar. En dadas circunstancias, idealmente se fotografía el espécimen y se toma una muestra de tejido [e.g., extremidad, pie ambulacral, tentáculo, un fragmento de la colonia (cnidarios, esponjas, ascidias, etc.) o de la aleta], como Voucher para su análisis y documentación molecular. En algunos casos, el ejemplar es llevado al laboratorio y devuelto a su hábitat a la mayor brevedad posible. Estas consideraciones se han tenido con ejemplares muy grandes [e.g., el pepino de mar *Stichopus horrens* (Selenka, 1867) y la estrella de mar *Acanthaster planci* (Linnaeus 1758) (Fig. 1)]. Se considera el conocimiento de las poblaciones, así como el número total de ejemplares por especie presentes en las muestras de cada localidad y la capacidad de procesamiento/



**Fig. 1.** Muestreo no letal. El buceo científico permite discriminar entre el muestreo letal o no letal. Así documentamos el cambio en el patrón de coloración y textura del tejido en la sección adyacente al brazo amputado de la estrella de mar *Acanthaster planci* tras extraer una muestra para secuenciación molecular. A) estado natural, B) amputación del extremo apical del ambulacro, C) cambio de color, D) cambio de textura del tejido.

almacenaje, como criterios para la recolecta. A fin de evitar el sobremuestreo, principalmente cuando se trata de especies poco conocidas o potencialmente amenazadas<sup>18</sup>. Siempre es recomendable mantener una distancia respetuosa de la vida marina y los elementos del medio mientras se realiza el buceo.

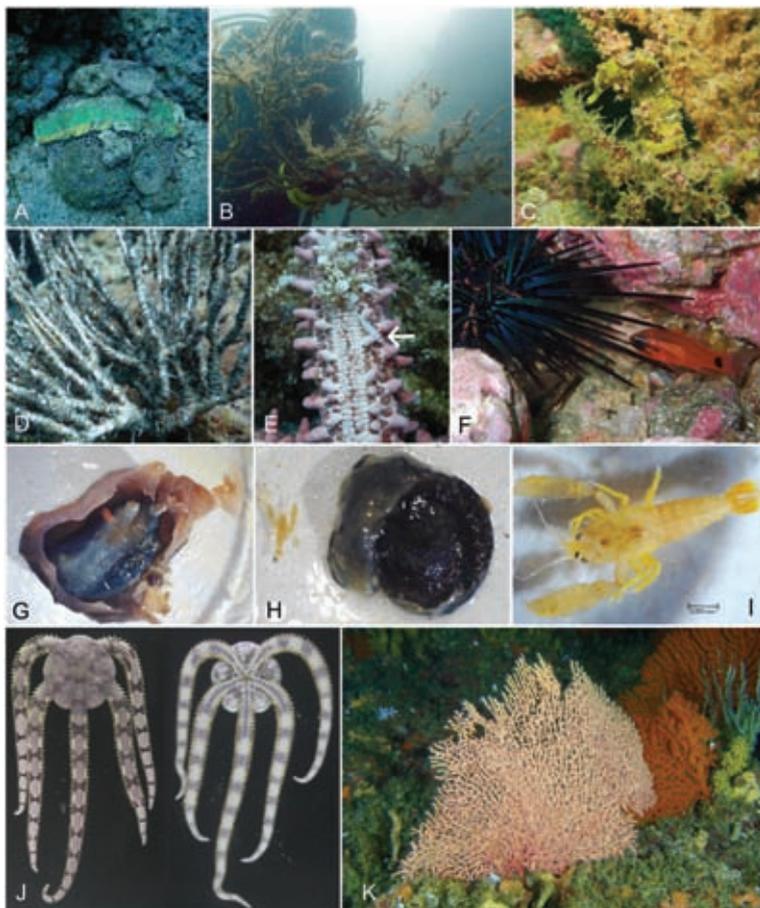
### **Caso de estudio**

#### *Inventariando la riqueza marina del Área de Conservación Guanacaste mediante el buceo científico (SCUBA)*

En el inventariado de especies marinas del ACG los sitios más explorados son los arrecifes de coral y roca, las plataformas rocosas, los fondos de basaltos, manglares y los bosques de octocorales. Los ambientes menos visitados son los bosques de coral negro, las praderas de algas y los fondos blandos. Esto se asocia directamente a la diversidad relativa de cada ambiente, pero también al sesgo particular de cada investigador y a los métodos de recolecta, ya que las técnicas empleadas y el esfuerzo dirigido a un determinado grupo/hábitat puede influir en la percepción de su riqueza<sup>12,13,21</sup>.

La implementación del buceo científico en el proyecto, ha permitido un incremento de casi el doble en el número total de especies registradas en el ACG. El uso de nuevas técnicas y metodologías de muestreo y preservación (especializadas para cada grupo taxonómico), han contribuido con esta mejoría. Esta percepción es sesgada por el aumento de especialistas e instituciones dedicadas al estudio de la biodiversidad marina en la región, así como al uso de técnicas-tecnologías no dependientes del buceo. Esto ha permitido una representación más completa del área, en términos de las entidades taxonómicas, muestras físicas, secuencias, registro audiovisual y metadatos (fotos/videos/coordenadas/profundidad), que serán la base de estudios taxonómicos, ecológicos, biogeográficos y evolutivos<sup>4,6,7,12,14,28,29</sup>.

El buceo científico en el ACG, alcanza un abordaje integral en el biomonitorio ecológico y en la documentación de especies. Debido a la gran diversidad de hábitats/ambientes que permite explorar, pero también por sus características selectivas y su compatibilidad con varias técnicas de recolecta (letales o no, Fig. 1) y toma de datos<sup>6,12,14,29</sup>. La caracterización y evaluación ecológica de comunidades marinas, la detección temprana de amenazas y cambios poblacionales asociados a actividades humanas, la identificación de asociaciones biológicas complejas, las ampliaciones de rango en los registros de distribución y la descripción de nuevas especies a partir de recolectas realizadas mediante el buceo científico, son ejemplo de la efectividad de esta herramienta y su aporte en el estudio de la diversidad marina del ACG (Fig. 2)<sup>4,8,26,30-32</sup>.



**Fig. 2.** Alcances del buceo científico en el estudio y documentación de la diversidad marina del ACG. **Amenazas y vulnerabilidad:** A) Erizo de mar *Toxopneustes roseus* (A. Agassiz, 1863) utilizando residuos de empaques para cubrirse. B) Colonia de coral negro *Myriopathes panamensis* (Verrill, 1869) impactada por malas prácticas de anclaje de embarcaciones. C) Caballito de mar *Hippocampus ingens* Girard, 1858, anclado a una línea de pesca. **Asociaciones:** D) Colonia de *Leptogorgia alba* (Duchassaing & Michelotti, 1864) con altas densidades del ofiuero *Ophiothela mirabilis* Verrill, 1867. E) Camarón *Zenopontonia aff. soror* (Nobili, 1904) en la estrella de mar *Mithrodia bradleyi* Verrill, 1867. F) El pez cardinal *Apogon dovii* Günther, 1862, buscando refugio entre las espinas del erizo *Diadema mexicanum* A. Agassiz, 1863. G-I) Disección de *Ascidia sideralis* Bonnet & Rocha, 2013, y su asociación con el camarón *aff. Ascidonia* sp. Fransen, 2002. **Nuevos registros y nuevas especies:** J) El ofiuero *Ophioplocus hancocki* (Ziesenhenné, 1935), fue considerado endémico de las Islas Galápagos. Este género se caracteriza por ser incubador. Superficie aboral (izq.) y oral (der.). K) El octocoral *Pacifigorgia senta* Breedy & Guzman, 2003, fue descrito con ejemplares recolectados mediante buceo científico en el ACG, en la foto se observan cientos de ofiueros sobre su estructura.

Hasta el momento se han recolectado más de 100 muestras en cada uno de los más de 10 grupos de distintos taxa estudiados en el proyecto, con un máximo de 2,700 para crustáceos. Las especies registradas por taxón van de 1 (Pennatulacea, Brachiopoda y Phoronida) a 209 (crustáceos)<sup>9,31</sup>. Las técnicas para la recolecta de especímenes dependen del hábitat, grupo taxonómico o gremio ecológico, las metodologías y el equipo también son variados (ver información suplementaria). Los resultados obtenidos en el proyecto son muy dependientes de las actividades de buceo científico.

Todos los Vouchers recolectados se depositan en el Museo de Zoología (MZUCR) o en el Herbario Dr. Luis A. Fournier Origgi (USJ), del Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical (CIBET) de la Universidad de Costa Rica. Además, se envían muestras de tejido al Centro para la Biodiversidad Genómica de la Universidad de Guelph (Center for Biodiversity Genomics, University of Guelph) para su secuenciación molecular. Algunos de ellos, cuentan con respaldos (réplicas) en colecciones científicas en el extranjero, o han sido extendidas a manera de préstamo a investigadores de instituciones foráneas bajo el marco de diversos estudios colaborativos.

Muchas de las especies registradas en el proyecto no cuentan con secuencias disponibles en las bases de datos de BOLD, GenBank u otros repositorios internacionales, incluyendo especies comunes y de amplia distribución en el PTO. Otras han sido poco reportadas o listadas por primera vez fuera de su ámbito de distribución nativa<sup>3-5</sup>. Se han descrito algunas especies con ejemplares recolectados mediante el buceo científico en el ACG<sup>8,32</sup> y se siguen procesando ejemplares que podrían resultar nuevos registros y especies nuevas para la ciencia. Los metadatos (información digital, secuencias moleculares, ubicación geográfica y batimétrica, etc.) asociados a los Vouchers, constituyen fuentes de información sin precedentes en el acervo de varios grupos taxonómicos de las colecciones del MZ-UCR y el USJ (e.g., Fig. 3). Dos de los repositorios biológicos más importantes de América Latina. Esto sin duda constituye uno de los alcances más notables del uso del buceo científico para el estudio de la diversidad marina en Costa Rica, en el marco del proyecto BioMar-ACG.

## **Recomendaciones**

El buceo científico ofrece oportunidades de mejora y retroalimentación para proyectos de investigación a largo plazo. El plan de regulación del ACG, promueve el desarrollo del turismo marino sostenible, la integración comunitaria en diversas plataformas y la promoción de venta de servicios ya existentes. De manera que se generen divisas mediante la conservación del patrimonio

natural, con programas de ciencia ciudadana y educación ambiental <sup>11,33</sup>. Continuar con el programa de parataxónomos marinos es esencial, ya que permite visibilizar y generar esfuerzos de conservación desde la comunidad.

La inclusión participativa de grupos locales, el intercambio de información y Vouchers entre proyectos e instituciones, el trabajo colaborativo entre unidades de investigación y el perfeccionamiento de técnicas de muestreo y preservación, mejorará la comprensión de la biodiversidad marina del ACG<sup>3-7,9,12-14,28,29,33</sup>. Consideramos indispensable documentar y divulgar la información científica más allá del ámbito académico, ya que actúa como agente de cambio para la legislación de los recursos naturales.

Las publicaciones en plataformas de acceso libre permiten evidenciar vacíos de información <sup>9,16,19,23</sup> y constituyen una herramienta de gestión muy valiosa. Al facilitar la identificación de líneas de trabajo a desarrollar, para lograr los objetivos de manejo y conservación del patrimonio natural <sup>22</sup>. Las horas de fondo en el buceo científico traducidas en publicaciones, impactan estrategias de conservación y justifican la inversión en programas de investigación a largo plazo. Favorecen el conocimiento y la protección de especies amenazadas, vulnerables y poco conocidas, así como el uso sostenible de los recursos y el desarrollo social. Recomendamos altamente la capacitación continua y reacreditación de certificados de destrezas en buceo, primeros auxilios y rescate. Así como otras licencias y capacitaciones competentes a las disciplinas de trabajo en el mar para todos los colaboradores (buzos, parataxónomos y tripulación).

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Rita Vargas, Frank Joyce, Yelba Vega, al Cuajiniquil Diving Center, Cristian Mora Barboza, Génesis Coto, Omar Domínguez, Eloisa Torres, Francisco Martínez, Omar Valencia, Yareli López, Pao Palacios, Andrea Nicolás, Carolina Salas Moya y Mario Espinoza, por su apoyo durante la recolecta de ejemplares y/o por brindar la información necesaria para desarrollar este trabajo. A Lucía Vargas Araya por sus comentarios de redacción. El financiamiento del proyecto BioMar-ACG ha sido mediante la Guanacaste Dry Forest Conservation Fund. Los permisos de recolecta se obtuvieron oportunamente a través del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Por último, agradecemos al equipo de buceo científico del CIMAR, e investigadores del proyecto que contribuyeron en el desarrollo y mejora del manuscrito y al comité editorial de este suplemento por la invitación.

## Información suplementaria

<https://figshare.com/articles/figure/17103026>

## Bibliografía

1. UNESCO. Área de Conservación Guanacaste. <https://whc.unesco.org/en/list/928>.
2. Angulo, A., Martínez-Servín, F., Torres-Hernández, E., Domínguez-Domínguez, O. & Cortés, J. Ictiofauna de la zona intermareal rocosa del Área de Conservación Guanacaste, Pacífico Norte de Costa Rica: diversidad y aspectos ecológicos y biogeográficos. *Rev. Biol. Trop.* 69, 20 (2021).
3. Chacón-Monge, J.-L., Azofeifa-Solano, J.-C., Alvarado, J.-J. & Cortés, J. Área de Conservación Guanacaste Echinoderms, North Pacific of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 487–500 (2021).
4. Chacón-Monge, J. L., Angulo, A. & Cortés, J. New hosts and morphological data for the Star pearlfish *Carapus mourlani* (Ophidiiformes: Carapidae) from collections made in the North Pacific coast of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 15 (2021).
5. González-Sánchez, K., Flores-Alvarado, B., Montiel-Barrantes, P., Gómez-Arce, G. & Alvarado, J. J. Ascidian diversity of Costa Rica, including new records for the North Pacific. *Rev. Biol. Trop.* 69, 12 (2021).
6. Matamoros-Calderón, W., Lara, M. & Breedy, O. Bosques de coral negro del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica: especies y distribución. *Rev. Biol. Trop.* 69, 11 (2021).
7. Vargas-Castillo, R. & Cortés, J. New records of marine decapods and stomatopods in Área de Conservación Guanacaste (ACG): four years of marine biodiversity inventorying. *Mar. Biodivers. Rec.* 12, 21 (2019).
8. Breedy, O. & Guzman, H. M. Revision of the genus *Adelogorgia* Bayer, 1958 (Cnidaria: Anthozoa: Octocorallia) with the description of three new species. *Zootaxa* 4369, 327 (2018).
9. Cortés, J. & Joyce, F. BioMar-ACG: A successful partnership to inventory and promulgate marine biodiversity. *Biotropica* 52, 1103–1106 (2020).
10. Janzen, D. H. Costa Rica's Area de Conservación Guanacaste: A long march to survival through non-damaging biodevelopment. *Biodiversity* 1, 7–20 (2000).
11. Janzen, D. H. & Hallwachs, W. Área de Conservación Guanacaste, northwestern Costa Rica: Converting a tropical national park to conservation *via* biodevelopment. *Biotropica* 52, 1017–1029 (2020).
12. Fernández-García, C., Salas-Moya, C., Mena, S., Azofeifa-Solano, J. C. & Alvarado, J. J. Diversidad de los hábitats submareales de la Península de Santa Elena e Islas Murciélagos, Pacífico Norte, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 20 (2021).

13. Suárez, A., Riosmena-Rodríguez, R. & Cortés, J. Checklist of invertebrates and conspicuous fishes in rocky reefs and Sargassum beds in the North Pacific of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 14 (2021).
14. Fallas-Madrugal, D. *et al.* Diversity of white spot patterns in the eagle ray *Aetobatus laticeps* (Myliobatiformes: Aetobatidae) in the north Pacific coast of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 10 (2021).
15. Drew, J. The Role of Natural History Institutions and Bioinformatics in Conservation Biology. *Conserv. Biol.* 25, 1250–1252 (2011).
16. Beaman, R. & Cellinese, N. Mass digitization of scientific collections: New opportunities to transform the use of biological specimens and underwrite biodiversity science. *ZooKeys* 209, 7–17 (2012).
17. Kress, W. J. Valuing collections. *Science* 346, 1310–1310 (2014).
18. Henen, B. T. DO SCIENTIFIC COLLECTING AND CONSERVATION CONFLICT? *Herpetol. Conserv. Biol.* 11, 13–18 (2016).
19. Costello, M. J. Taxonomy as the key to life. *Megataxa* 1, (2020).
20. De Castro Cantuária, P. *et al.* An Introduction to the Importance of Scientific Collections. *Coleções científicas do Ampá* Vol. I Flora e Fauna, 13–22 (2021).
21. Hughes, A. C. *et al.* Sampling biases shape our view of the natural world. *Ecography* 44, 1259–1269 (2021).
22. Thomson, S. A. *et al.* Taxonomy based on science is necessary for global conservation. *PLOS Biol.* 16, e2005075 (2018).
23. Canonico, G. *et al.* Global Observational Needs and Resources for Marine Biodiversity. *Front. Mar. Sci.* 6, 367 (2019).
24. Conix, S. *et al.* Towards a global list of accepted species III. Independence and stakeholder inclusion. *Org. Divers. Evol.* (2021) doi:10.1007/s13127-021-00496-x.
25. Lien, A. M. *et al.* Towards a global list of accepted species IV: Overcoming fragmentation in the governance of taxonomic lists. *Org. Divers. Evol.* (2021) doi:10.1007/s13127-021-00499-8.
26. Murillo-Zamora, C. Gestión de fronteras marítimas: el caso de Costa Rica y Nicaragua en el océano Pacífico. *Rev. Biol. Trop.* 69, 14 (2021).
27. Thomson, S. A. *et al.* Towards a global list of accepted species II. Consequences of inadequate taxonomic list governance. *Org. Divers. Evol.* (2021) doi:10.1007/s13127-021-00518-8.
28. López-Garro, A. & Zanella, I. Residency of bull sharks, *Carcharhinus leucas* (Carcharhiniformes: Carcharhinidae), at San Pedrillo Islet in Islas Murciélago, North Pacific of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 10 (2021).
29. Méndez-Venegas, M., Jiménez, C., Bassey-Fallas, G. & Cortés, J. Condición del arrecife coralino de Playa Blanca, Punta Gorda, uno de los arrecifes más extensos de la costa Pacífica de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 69, 14 (2021).

30. Eisele, M. H., Madrigal-Mora, S. & Espinoza, M. Drivers of reef fish assemblages in an upwelling region from the Eastern Tropical Pacific Ocean. *J. Fish Biol.* 98, 1074–1090 (2021).
31. Cortés, J. Marine biodiversity baseline for Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica: published records. *ZooKeys* 652, 129–179 (2017).
32. Breedy, O. & Guzman, H. M. Octocorals from Costa Rica: The genus *Pacifigorgia* (Coelenterata: Octocorallia: Gorgoniidae). *Zootaxa* 281, 1 (2003).
33. Palacios-Martínez, G. E. & Núñez-Zamora, I. Posibilidades de promoción social para los pescadores costeros de Playas del Coco, Guanacaste, Costa Rica, utilizando el Turismo Marino Sostenible. *Rev. Biol. Trop.* 69, 7 (2021).
34. Mak, Y., Tao, L., Ho, V., Dudgeon, D., Cheung, W. & Leung, K. (2021). Initial recovery of demersal fish communities in coastal waters of Hong Kong, South China, following a trawl ban. *Rev Fish Biol Fisheries* 31, 989–1007 (2021).

## Metodologías para el monitoreo de octocorales, esponjas y cobertura béntica en los arrecifes rocosos de El Salvador, Centroamérica

Johanna Segovia\*

### Resumen

El patrimonio natural de El Salvador incluye los ecosistemas frágiles de arrecifes, los cuales proveen de medios de vida a las comunidades costeras, protegen la costa y sostienen el ciclo de vida de muchas especies que proporcionan equilibrio a la zona costero marina del país. Los investigadores involucrados en el programa de “Monitoreo de octocorales, esponjas y cobertura béntica en los arrecifes rocosos de El Salvador” buscan evaluar la dinámica de las comunidades bénticas como base del sistema e identificar impactos positivos y negativos de origen antrópico y/o natural. El resultado de los esfuerzos de investigación que se realizan entorno al programa, se utiliza para la difusión y divulgación científica, con la finalidad de aumentar la sensibilidad ambiental en la sociedad salvadoreña, y la disponibilidad de conocimiento para los tomadores de decisión del país. El monitoreo involucra actividades subacuáticas de buceo libre y con equipo SCUBA, para los cuales se ha estructurado un manual de procedimientos, planes de inmersión, emergencia y evacuación de las actividades subacuáticas, y un protocolo de seguridad para la práctica de buceo.

El diseño muestral incluye tres puntos por tres profundidades diferentes en arrecifes del oriente y occidente del país, en los cuales se registran variables biológicas a través del método de transecto y cuadrante, tanto permanentes como no permanentes. Asimismo, en los puntos se recolectan muestras de agua para medir su procesamiento en un laboratorio registrado con la finalidad de registrar los parámetros físicos y químicos, con excepción de la profundidad, temperatura y el Índice de Rugosidad (IR) los cuales se realizan *in situ* con sensores ambientales y la metodología de Luckhurst y Luckhurst

\* Universidad Francisco Gavidia, San Salvador, El Salvador.

(1978). Los datos generalmente se analizan con Componentes Principales para conocer cómo se relacionan las variables.

Los resultados del monitoreo han permitido aumentar el registro de la biodiversidad marina de El Salvador, conocer la dinámica béntica de las macroalgas y el impacto del fenómeno de El Niño 2014-2016 en los corales formadores de arrecife de la especie *Porites lobata*, así como identificar nuevas líneas de investigación en torno a comunidades biológicas importantes de este ecosistema (octocorales y esponjas) y especies exóticas (*Carijoa riseii* y *Acanthophora spicifera*).

## Objetivo

Las metodologías del monitoreo fueron diseñadas para evaluar la dinámica de las comunidades bénticas de los arrecifes rocosos de El Salvador, con la finalidad de identificar impactos positivos y negativos de origen antrópico o natural en el ecosistema, así como generar información para la divulgación científica y aumentar la sensibilidad ambiental de la sociedad salvadoreña.

## Procedimientos mínimos de seguridad

El desarrollo del “Monitoreo de octocorales, esponjas y cobertura béntica en los arrecifes rocosos de El Salvador, Centroamérica” incluye un manual de procedimientos para la práctica de actividades subacuáticas y un plan de inmersión, emergencia y evacuación en caso de emergencia y, asimismo, un protocolo de seguridad para la práctica de buceo.

El manual de procedimientos detalla la reglamentación, restricciones, recomendaciones, registros, organización y planificación, así como el procedimiento para descompresión de ser necesario. Se reconoce la importancia y la obligatoriedad del buceo en pareja, la preparación, revisión y mantenimiento del equipo de buceo, botiquín de primeros auxilios y la unidad de oxígeno. Asimismo, la planificación de la inmersión, práctica de procedimientos, el incumplimiento de los tiempos de buceo establecidos, las características presentes en el agua para la cancelación de una actividad subacuática, condiciones mínimas para el transporte del equipo, pasos y factores para la evaluación de riesgos. Además, se incluye la marcha protocolar de enfermedades o padecimientos originados en las actividades subacuáticas, con los problemas, causas, signos-síntomas, el tratamiento, y a dónde debe referirse a la persona.

El plan de inmersión, emergencia y evacuación de manera general comprende: (1) La ficha resumen que contiene la información general como participantes, responsable de la actividad, los objetivos, la zona y puntos de trabajo,

incluyendo coordenadas y su ubicación en un mapa náutico. La programación tiene la fecha, hora de inicio y finalización del esfuerzo de trabajo por punto de muestreo. (2) El plan de inmersión que detalla el tiempo de buceo, el número de buzos, la información de la parada de seguridad, así como el lugar de zarpe y llegada. (3) El plan de emergencia con el nombre de la base en tierra, el nombre de las embarcaciones, el lugar de embarcación y de evacuación, asimismo las pautas a seguir en caso de accidente, la temporización de las acciones y los contactos de médicos especialistas requeridos para la atención de problemas y accidentes de buceo, referencias de hospitales con cámara hiperbárica y los contactos de emergencia y padecimientos personales del personal involucrado en buceo.

## **Materiales y métodos**

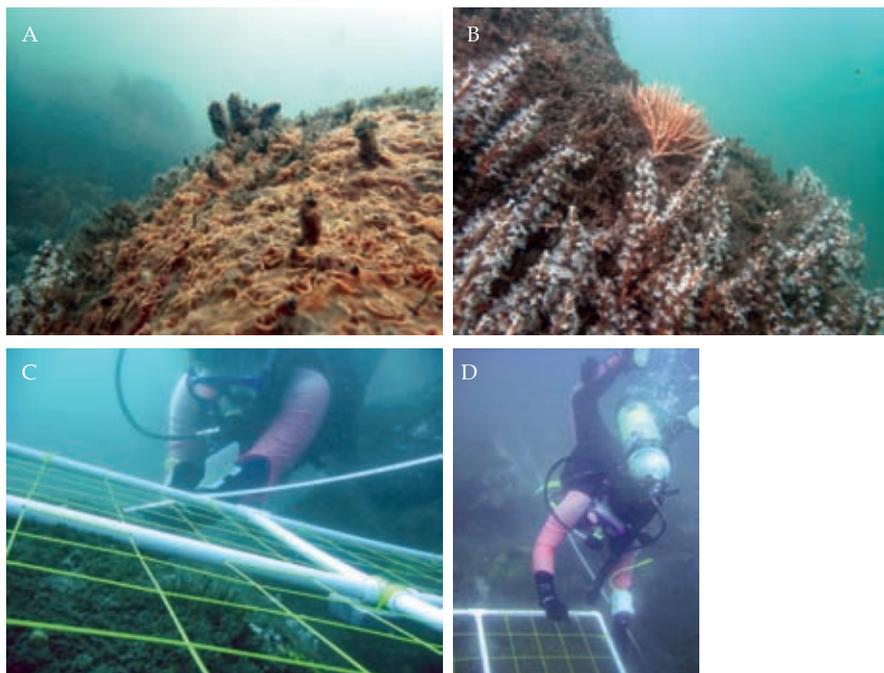
*Diseño muestral:* las comunidades bénticas de los arrecifes rocosos de El Salvador poseen diferencia en composición y estructura por profundidad (4, 5, 8, 1, 9, 7, 6) y entre el sector oriental y occidental del país (Segovia, 2012; Segovia et al. 2021). Por ello los puntos de muestreo del monitoreo se ubican en tres profundidades: tres entre 0 a 5 metros, tres entre 5 a 15 metros y tres entre 20 a 40 metros. Así mismo, se establecen en los extremos de la vertiente del Pacífico de El Salvador, al occidente en Los Cóbanos (Sonsonate) y al oriente en Punta Amapala (La Unión). Los puntos entre 0 a 5 metros de profundidad se realiza con buceo libre y los demás puntos con mayores profundidades con buceo SCUBA.

En los mismos puntos se registran las variables físicas y químicas (Índice de Rugosidad IR, profundidad, transparencia horizontal del agua, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, sulfatos y turbidez) en marea alta, a excepción del IR. La temperatura en los puntos de 0 a 5 metros de Los Cóbanos se registra en ambas mareas, ya que en el área se presentan comunidades coralinas vulnerables al calentamiento del agua superficial por el Fenómeno de El Niño, y donde para el 2014-2016 se registraron variaciones de temperatura entre marea de 4 °C provocando eventos de blanqueamiento intenso y la pérdida de cobertura de coral (Segovia 2017, Elías et al. 2021).

*Métodos:* la riqueza de especies y cobertura bentónica (división de algas, turf, bosque de hidroides, esponjas, zoantidos, octocoral exótico *Carijoa*, roca y arena) (Figura 1A y 1B) y la frecuencia/densidad de las especies de octocorales y esponjas se estima con dos transectos paralelos a la costa de 30 m de longitud separados por 15 m entre sí. Cada uno es recorrido alternando un cuadrante de PVC de 1 m<sup>2</sup> (Figura 1C y 1D). En los transectos de 0 a 5 metros

de profundidad en Los Cóbanos se utiliza transecto horizontal permanente debido a la fragilidad de la comunidad coralina presente en esa área. El Índice de Rugosidad se registra colocando una cadena de 10 metros de longitud acoplada al relieve del sustrato, luego se mide la distancia de punta a punta de la cadena, su estimación se realiza con la siguiente fórmula (Luckhurst y Luckhurst 1978):  $1 - (\text{Distancia horizontal cubierta por la cadena} / \text{Longitud total de la cadena})$ . La profundidad y temperatura se registra con sensores ambientales y una computadora de buceo, la transparencia horizontal con un Disco Secchi y las demás variables físicas y químicas con una muestra que se recolecta y traslada según protocolos de un laboratorio certificado, quienes son los responsables de procesarla.

Análisis de los datos: la riqueza de especies se representa con un listado sistemático. La cobertura béntica y la frecuencia/densidad de las especies de octocorales y esponjas se comparte con estadística descriptiva y se realiza Análisis de Componentes Principales (ACP) para conocer la relación que existe entre las variables biológicas, químicas y físicas.



**Figura 1.** Registro de variables biológicas en monitoreo de arrecifes rocosos de El Salvador: A. Esponja *Mycale cecilia* y colonias de *Muricea austera*, B. *Carijoa roseii* y colonia de *Leptogorgia alba*, C y D. Registro de cobertura béntica y abundancias de octocorales y esponjas.

**Caso de estudio**

*Evento de blanqueamiento en el Niño 2014-2016 en los arrecifes de borde de Los Cóbano, El Salvador.*

El Fenómeno de El Niño intensificado por el Cambio Climático, así como el incremento de las actividades antropogénicas ponen a prueba la resiliencia de los arrecifes, y su conservación dependerá de nuestra capacidad para comprender los procesos biológicos y ecológicos que dinamizan los ambientes de estos ecosistemas, por lo cual es importante estudiar y conocer su capacidad de resistir, adaptarse y dar respuesta a los factores que influyen y conducen a cambios estructurales (Madin et al. 2016). El monitoreo de arrecifes rocosos ha permitido registrar que uno de los factores importantes que hace vulnerable a los arrecifes con comunidades coralinas



**Figura 2.** Coral formador de arrecifes *Porites lobata* en evento de blanqueado 2014-2016, Los Cóbano, El Salvador: A y B Blanqueamiento y muerte de las colonias, C y D: cobertura de *Acanthophora spicifera* en el arrecife y sobre colonias de coral, E: *Acanthophora spicifera* sobre colonia de coral en 2006 y F: *Acanthophora spicifera* sobre la misma colonia de coral de la fotografía E en 2014.

de Los Cóbano es su condición de arrecife costero, el cual por condiciones oceánicas sufre cambios de marea de hasta tres metros. Lo anterior deja expuestas a desecamiento y la irradiación solar a colonias de *Porites lobata* y, a su vez, intensifica la anomalía de temperatura hasta 4 °C, provocando eventos de blanqueamiento y muerte (Figura 2A y 2B). El agua cálida y la disponibilidad de sustrato beneficiaron al alga exótica *Acanthophora spicifera* para su proliferación y ganancia de cobertura (Figura 2C y 2D), actuando de manera oportunista ante estos eventos de mortalidad de coral (Figura 2E y 2F) (Segovia 2017). Más recientemente, el monitoreo ha permitido obtener nuevos registros de especies, aumentando la biodiversidad del país sobre todo en octocorales y esponjas (Trejo, 2020; Trejo et al. 2021, Segovia y Trejo *en prensa*). Asimismo, conocer que existe una dinámica en el crecimiento y comportamiento de *Carijoa risei*, la cual será objetivo de futuros estudios.

## Bibliografía

1. Elías Ilosvay, X.E., Segovia, J., Ferse, S., Elias, W.E. & Wild, C. (2021). Aumento relativo rápido de algas coralinas crustosas luego de la exclusión de herbívoros en un arrecife de El Salvador. *PeerJ* 9: e10696 <https://doi.org/10.7717/peerj.10696>.
2. Luckhurst, B.E., Luckhurst, K. (1978). Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology* 49, 317-323 <https://doi.org/10.1007/BF00455026>.
3. Madin, J.S., Hoogenboom, M.O., Connolly, S.R., Darling, E.S., Falster, D.S., Huang, D., Keith, S.A., Mizerek, T., Pandolfi, J.M., Putnam, H.M., Baird, A.H. (2016). A trait-based approach to advance coral reef science. *Trends in ecology & evolution* 31:419-428.
4. Segovia, J. (2012). Comunidad de octocorales (Cnidaria: Octocorallia) en El Salvador, América Central (Tesis de Postgrado). Universidad de Costa Rica: Costa Rica.
5. Segovia, J. (2017). Impactos de El Niño 2014-2016 en las comunidades bénticas de los arrecifes de borde, Los Cóbano, El Salvador, Centroamérica. 17° Congreso Latino-Americano de Ciencias do Mar – COLACMAR 2017.
6. Segovia, J. y Trejo, A. (en prensa). Comunidades bénticas de los arrecifes rocosos en Los Cóbano con tres nuevos registros a la biodiversidad de El Salvador.
7. Segovia, J., Breedy, O. y Cortes, J. (2021). Gorgonias (Octocorallia: Alcyonacea) de aguas someras de El Salvador. *Realidad Reflexión*, 54(54), 66-94. <https://doi.org/10.5377/ryr.v54i54.12067>.

8. Trejo, A. (2020). Distribución espacial de esponjas (Porifera: Demospongiae) en aguas someras del Área Natural Protegida Complejo Los Cóbano, El Salvador (Tesis de Licenciatura). Universidad de El Salvador: El Salvador.
9. Trejo Ramos, A. , Carballo Cenizo, J. J. L., & Segovia de González, J. V. (2021). Diversidad y abundancia de esponjas perforadoras del Área Natural Protegida Complejo Los Cóbano, El Salvador. *Realidad Y Reflexión*, 54(54), 36-49. <https://doi.org/10.5377/ryr.v54i54.12057>



## Especialidad de buceo para el monitoreo de agregaciones reproductivas de peces como una herramienta de conservación y ecoturismo

---

Arturo Hernández Velasco\*

Arturo Ramírez Valdez\*\*

Edgardo Ochoa\*\*\*

---

Las agregaciones de peces son eventos importantes para la preservación de especies marinas y así mismo son una fuente importante de recursos para la pesca. Hoy en día estos eventos están siendo aprovechados con fines comerciales y ecoturísticos, brindando una alternativa más para las comunidades locales que dependen de estos recursos. Utilizando el conocimiento de las comunidades locales y aplicando técnicas probadas para el monitoreo ambiental, se creó una certificación de buceo especializada en Monitoreo de Agregación de Peces, dicha especialidad está avalada y registrada con la Asociación Profesional de Instructores de Buceo (PADI, por sus siglas en inglés) bajo el nombre de *PADI - Fish Spawning Aggregation Monitoring Diver*. A la fecha más de 20 personas en comunidades costeras se han incorporado como monitores para el seguimiento y conservación de estos eventos. Como parte de la capacitación se ha dotado a los participantes de capacidades en el manejo de grupos de buceo, que a su vez representan un modo de aprovechamiento y aportan información que es utilizada en la toma de decisiones sobre conservación y manejo.

---

\* Comunidad y Biodiversidad A.C. Proyecto Mero Gigante. Calle isla del peruano #215 , col Lomas de miramar, guaymas Sonora cp 85448, México

\*\* Proyecto Mero Gigante. Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego. Facultad de Ciencias Marinas, UABC

\*\*\* Conservation International. EUA

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

El curso para obtener la especialidad PADI - *Fish Spawning Aggregation Monitoring Diver* incluye secciones teórica y práctica con dos inmersiones en aguas abiertas, las cuales se deberán de realizar durante horas de luz diurna. Las inmersiones realizadas durante el ocaso podrían tener mayor probabilidad de encontrar agregaciones de desove debido al comportamiento natural de peces que se agregan para reproducirse. Se recomienda un mínimo de 10 horas de buceo para acreditar la especialidad.

La selección de los sitios para desarrollar dicha especialidad debe contar con condiciones y entornos adecuados para completar los requisitos y las destrezas o nivel de certificación de buceadores y buceadoras a esta especialidad. Las inmersiones poco profundas proporcionarán a las personas más tiempo de fondo para completar tareas. Se recomienda utilizar diferentes sitios de buceo en aguas abiertas, si es posible, para brindar a estudiantes la experiencia de enfrentar con una mayor variedad de condiciones ambientales (incorporar técnicas respetuosas con el medio ambiente a lo largo de cada inmersión) y desafíos logísticos.

## **Materiales para monitoreo de agregaciones reproductivas de peces**

1. Equipo básico de buceo (traje acorde con temperatura del agua, aletas, visor, esnórquel y sistema de lastre), computadora, BCD, regulador (con manómetro, profundímetro, brújula y fuente de aire alternativa), tanque de buceo.
2. Equipo de monitoreo (tablas acrílico, lápices, hojas con formato impreso, GPS).
3. Equipo para identificación sitios de agregaciones de peces (*Fish Finder*, cartas batimétricas, tablas de marea y fases lunares).
4. Señalización (bandera de buceo, boya de señalización, silbato de emergencia).
5. Kit de herramientas y kit emergencia (botiquín, tanque de Oxígeno con regulador armado y protocolo de evacuación para la zona).
6. Sistema de comunicación (radio de banda marina o privada en la embarcación, teléfono celular y/o satelital).

Los buceadores y buceadoras siempre desarrollarán inmersiones siguiendo el sistema de parejas. Los equipos de búsqueda de agregaciones deberán es-

tar separados mientras estén sumergidos a por un máximo 10 m de distancia. Antes de cada inmersión se revisará el plan de buceo (tiempos, profundidades, objetivo de inmersión).

El nivel mínimo de certificación de participantes es PADI Advanced Open Water (o equivalentes) con un mínimo de 10 buceos en bitácora reportadas para el sitio o condiciones similares al sitio. Durante los cursos y expediciones de monitoreo se debe contar con líderes en cada operación con completa responsabilidad de la seguridad de los buceadores y buceadoras (nivel de certificación mínimo PADI Dive Master o equivalente). La organización del equipo y la proporción de buzos de cada embarcación será de acuerdo con el nivel de experiencia, capacitación de los tripulantes y capacidad de la embarcación.

Se debe evitar bucear a profundidades mayores a 30 metros (considerando el tiempo que se emplea para desarrollar cada metodología). Se recomienda realizar los buceos de monitoreo de 20-25 metros/60-80 pies. En todos los buceos se deben seguir estándares de buceo seguro establecidos por agencias como PADI o equivalentes.

## Objetivos

El propósito de la especialidad de Monitoreo de Agregación de Peces (*PADI-Fish Spawning Aggregation Monitoring Diver*) es proporcionar la formación necesaria para poder identificar, evaluar y monitorear las agregaciones de desove de peces. Una vez entrenadas las personas con dicha especialidad, tendrán la capacidad de evaluar cuantitativamente y monitorear las agregaciones de desove de peces utilizando técnicas de censo visual para proporcionar datos confiables a los programas de investigación regionales.

## Materiales y métodos

La especialidad consta de dos secciones, una teórica y una práctica. Dentro de la sección de teoría se instruye sobre los programas de monitoreo de agregación de desove de peces y se define qué es una agregación de desove de peces; proporcionando ejemplos y mostrando imágenes y videos de estos fenómenos. Posteriormente se detectan las amenazas a los sitios de agregación, la importancia de la protección y la gestión potencial aplicable en la región y en los sitios donde estarán participando los aspirantes a esta especialidad, haciendo referencia a estudios previos y áreas donde las agregaciones de desove han sido protegidas de la pesca. Se describen las herramientas y técnicas

que se pueden utilizar para localizar y monitorear las agregaciones de desove de peces, describiendo las condiciones biofísicas que generalmente se encuentran en los sitios de agregación. Dentro la sección práctica se aprenderá a realizar censos submarinos de estos eventos (identificación de especies, características que indican que es un evento de desove, estimación de tallas y abundancias), también se realizará un mapeo del sitio. Finalmente, se hace una recopilación de datos dependientes de la pesca.

Durante el entrenamiento se comparte información sobre las especies conocidas/reportadas para desovar en la zona, haciendo una lista de especies clave y se habla sobre la estacionalidad de estos eventos de desove para cada especie, incluyendo información sobre las fases lunares y los ciclos reproductivos. Se recomienda ayudarse de protocolos de monitoreo de agregaciones de peces (Ramírez-Valdez et al., 2018; Fernández-Rivera Melo et al., 2015; Hernández-Velasco et al., 2018) .

Los buceadores y buceadoras completan una prueba de identificación de peces con presentaciones de diapositivas para confirmar el conocimiento de las especies, donde se evalúa la identificación correcta de especies y características morfológicas que dan evidencia de etapas reproductivas en las especies..

Antes de salir a bucear se debe destacar la importancia de un control efectivo de la flotabilidad y técnicas de buceo seguras, hablando de la importancia de la flotabilidad neutra, el uso correcto de equipo de lastre (plomos), el equipo y posición hidrodinámica bajo del agua, la planificación del buceo teniendo en cuenta el consumo de aire, los procedimientos de los compañeros y la planificación de buceos considerando el medio ambiente (Ochoa 2021).

### **Caso de estudio**

En las costas del Pacífico de la Península de Baja California, existen sitios y temporadas donde comunidades pesqueras aprovechan los eventos de agregaciones reproductivas pescando a los organismos que se agregan, tal es el caso de la Isla Natividad en Baja California Sur, Arrecife de Sacramento y Punta Baja en Baja California. Con base en observaciones de los pescadores y de algunos investigadores, se tiene información de estos eventos y se ha logrado identificar que para algunas especies como el mero gigante *Stereolepis gigas*. Estos sitios y eventos han sido identificados por varias generaciones. Hoy en día estos lugares no solo están siendo aprovechados para la pesca comercial, ahora se están utilizando con fines recreativos y de conservación (Hernández-Velasco et al., 2021).

En 2017, Proyecto Mero Gigante y Comunidad y Biodiversidad A.C., en colaboración con las cooperativas pesqueras SCPP Buzos y Pescadores de la Baja California y SCPP Ensenada, iniciaron un proyecto de investigación para comprender el ciclo de vida de los meros gigantes y generar la información necesaria para conocer el tamaño de sus poblaciones. Como parte de las acciones se estableció un programa de monitoreo permanente de la pesquería y de registros visuales de la especie, donde los buzos de las comunidades son los que realizan las observaciones y los monitoreos (Ramírez et al., 2017). Después de un año de recabar información y establecer colaboraciones, se llevó a cabo una expedición de buceo a cuatro comunidades de la Península de Baja California para poder registrar su presencia, comportamiento y compilar un registro de imágenes en fotografía y video. Este proyecto está recolectando información que ayudará a comprender más de la biología, distribución y abundancia de esta especie ([www.merogigante.org](http://www.merogigante.org)).

Para esta investigación, se han capacitado con la especialidad de *PADI-Fish Spawning Aggregation Monitoring Diver* a más de 20 personas de comunidades pesqueras con la finalidad de que participen activamente en la toma de información e identificación de sitios donde tienen registro histórico de avistamiento (ya sea pescándolos u observación directa mediante buceo). Se han formado grupos de exploración y monitoreo los cuales consisten de personas capacitadas con dicha especialidad acompañados de científicos que colectan la información aportando su conocimiento y experiencia para el proyecto. Con esto se involucra a las comunidades locales en cada aspecto del proyecto, puesto que no es solamente aprovechar la conexión que tienen a factores ambientales, sino también por los lazos sociales y culturales que la comunidad tiene con su entorno.

En la isla Natividad desde el 2006, se ha tenido la oportunidad de bucear en estos eventos reproductivos del Mero gigante (*Stereolepis gigas*). No fue hasta el 2017 que se comenzaron a explorar más sitios e identificar algunos donde año con año se agregan los meros gigantes. Con la ayuda de pescadores locales y científicos se ha logrado documentar dichos eventos. Con dicha información y registro la SCPP Buzos y Pescadores de la Baja California, tomó la decisión de ofrecer viajes ecoturísticos donde el principal atractivo es la observación de este fenómeno y contribuir en la colecta sistemática de información. En estas expediciones de buceo turistas contemplan y viven la experiencia que brindan las agregaciones reproductivas de mero gigante, siendo acompañados siempre de una persona certificada con la especialidad *PADI-Fish Spawning Aggregation Monitoring* quien registra estos eventos siguiendo un método de muestreo sistemático. Aportando información de comportamiento, número de organismos y agregaciones en el sitio y temporalidad.

En el 2019 un grupo de 20 buzos recreativos visitaron la Isla Natividad y vivieron la experiencia de buscar estas agregaciones con buzos de la comunidad que colectaban información para el monitoreo de estos eventos reproductivos de peces. Hoy en día en la isla se organizan expediciones de buceo recreativo, dejando una derrama económica variada, pero siempre siendo más redituable que la pesca. A sí mismo las ganancias no solo las reciben una sola persona o equipo pesquero, con el buceo en estos eventos reproductivos de peces más familias en la comunidad se ven beneficiadas, siendo una alternativa económica para las personas que habitan en la Isla Natividad (Ramírez et al., 2021).



**Fig 1 Monitoreo megafauna.**



**Fig. 2. Monitoreo mero gigante en Punta prieta.**

## Recomendaciones

Una vez que los participantes toman la especialidad *PADI-Fish Spawning Aggregation Monitoring Diver* se recomienda que al menos una vez por año tomen una sesión teórica para recordar técnicas y estándares para el monitoreo y evaluación e identificación de los eventos de agregaciones reproductivas de peces

Generar grupos de monitoreo mixtos, donde mujeres y hombres de la comunidad y especialistas participen y se involucren en proyectos de monitoreo, evaluación e identificación de los eventos de agregaciones reproductivas de peces.

Contar con programa de comunicación y difusión de estos esfuerzos tanto a nivel local como a nivel regional con el fin de contar con un reconocimiento sectorial de estos esfuerzos y acciones de conservación y aprovechamiento de los eventos de agregaciones reproductivas de peces

Establecer un programa de financiamiento y sostenibilidad financiera para mantener el monitoreo, evaluación e identificación de los eventos de agregaciones reproductivas de peces, proveniente de ganancias generadas por el ecoturismo u otras fuentes de financiamiento.

Realizar estudios de capacidad de carga de los sitios de buceo donde se pretenden realizar actividades ecoturísticas de avistamiento de las agregaciones reproductivas de peces con la finalidad de no alterar el comportamiento en los peces.

## Bibliografía

1. Fernández-Rivera Melo, F.J. Análisis de Métodos de monitoreo empleados para evaluar el estado de las Áreas Naturales Protegidas marinas en el Golfo de California. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 108pp.(2015).
2. Hernández-Velasco, A, Caamal, J, Suarez, A, Pérez Alarcón, F, y Fulton, S. Protocolo de Monitoreo para reservas marinas. Comunidad y Biodiversidad A.C., Guaymas, Sonora.(2018).
3. Hernández-Velasco A.; Ramírez-Valdez A.; Domínguez Guerrero I.; Ochoa, E.; Castro, J. Buceando en la Península de la Baja con los Meros Gigantes. Espacio Profundo Ed 176- pag 6 (2021).
4. Ramírez-Valdez, A.; Sgarlata, M.P.; Villaseñor-Derbez, J.C.; Rowell, T.J.; Erisman, B.; Hernández-Velasco, A. Buscando al gigante de los bosques de kelp en las aguas de Baja California. Revista Mediterranean, volumen 2, número 9, 19-24 pp.(2017).

5. Ramírez-Valdez, A.; Sgarlatta, M.P.; Villaseñor-Derbez, J.C.; Cota-Nieto, J.J.; Rowell, Erisman, B. Manual para monitoreo biológico del Mero gigante (*Stereolepis gigas*) en aguas mexicanas: Proyecto Mero gigante del Pacífico mexicano. SIO-UCSD, UABC, COBI A.C., ECOCIMATI A.C., 42 pp (2018).
6. Ramírez-Valdez, A., Rowell, T. J., Dale, K. E., Craig, M. T., Allen, L. G., Villaseñor-Derbez, J.C., Cisneros-Montemayor, A. M., Hernández-Velasco, A., Torre, J., Hofmeister, J., & Erisman, B. E. (2021). Asymmetry across international borders: Research, fishery and management trends and economic value of the giant sea bass (*Stereolepis gigas*). *Fish and Fisheries*, 00, 1-20. <https://doi.org/10.1111/faf.12594>.
7. Ochoa. E. (2021). Data-Driven Diving. *The Undersea Journal*. 1Q2021 pp.60.

## Comparación de tres métodos para el estudio de las comunidades bentónicas sésiles en arrecifes coralinos

---

Ana M. Palacio Castro\*  
Fernando A. Zapata\*

---

El monitoreo de un ecosistema requiere obtener eficientemente información que refleje su estado de conservación y detecte sus cambios a través del tiempo. Los procesos de deterioro que han afectado a los arrecifes coralinos en las últimas décadas han promovido la implementación de variados protocolos de monitoreo. La mayoría de métodos para la evaluación del bentos arrecifal se basan en estimaciones visuales usando cuadrantes, transectos lineales, transectos en banda, fotos y video. Las ventajas y desventajas de estas técnicas se han discutido desde la década de 1970 y continúan siendo debatidas aún hoy. Principalmente porque no todos los métodos son adecuados para todos los sitios de estudio, producen la información necesaria para el programa de monitoreo o se ajustan a las habilidades del equipo encargado o al presupuesto<sup>1-3</sup>.

Una consideración es si resulta más práctico implementar estimaciones “visuales” de la cobertura que dependen de la apreciación subjetiva del observador, en contraste con técnicas basadas en el muestreo de puntos o la digitalización de imágenes que disminuyen el error humano en las mediciones. A pesar de su subjetividad, las estimaciones visuales han mostrado en ocasiones mayor exactitud y repetibilidad que otros métodos considerados más objetivos<sup>4</sup>.

Por otra parte, los métodos basados en estimaciones bi-dimensionales (como las fotografías y los cuadrantes que estudian el arrecife como un plano)

---

\* Universidad del Valle, Cali, Colombia

generalmente sobrestiman la cobertura de organismos planos como las colonias de coral en forma de plato o masivas y subestiman la de organismos ramificados y columnares. Sin embargo, estos métodos no permiten evaluar fácilmente el relieve especialmente en sustratos muy irregulares o con una alta tridimensionalidad<sup>5</sup>.

Algunas de las ventajas de la fotografía frente a otros métodos son la conservación de la información para repetir o realizar nuevos análisis, recoger información adicional no registrada por los buzos (e.g., efectos de tormentas, complejidad espacial, reclutamiento de corales, crecimiento y mortalidad de colonias individuales, presencia de enfermedades). Así como la posibilidad de disminuir el error humano en las mediciones<sup>1</sup>. Sin embargo, la identificación de especies similares en fotografías puede resultar difícil. Por lo general los métodos fotográficos disminuyen el tiempo para tomar datos en campo, aunque aumentan el tiempo para su tratamiento en el laboratorio<sup>6</sup>.

Una de las mayores ventajas de los métodos basados en cadenas es que permiten estimar la complejidad topográfica, pero por lo general son tediosos y demorados en su implementación. Así mismo, es difícil garantizar que las cadenas sean ubicadas en el mismo sitio en cada muestreo, por lo que se pueden obtener datos que indican cambios en la cobertura de organismos, pero que en realidad reflejan el cambio de posición de la cadena<sup>2</sup>.

Además de las ventajas y desventajas comparativas de cada método, aún se debate qué tan válida es la comparación de información obtenida con diferentes técnicas. Esto tiene repercusiones, no sólo para la comparación de diferentes localidades evaluadas con diferentes métodos, sino también para garantizar la continuidad y comparabilidad de la información colectada en un mismo arrecife con diferentes métodos.

## **Objetivos**

Este capítulo evalúa la comparabilidad, reproducibilidad y eficiencia de tres métodos usados para el monitoreo del bentos en arrecifes coralinos, enfocándose en la cobertura de corales y algas y la riqueza de especies de coral. La comparabilidad se refiere al grado de similitud entre estimaciones obtenidas con diferentes métodos. La reproducibilidad examina la similitud entre estimaciones obtenidas por diferentes investigadores usando el mismo método. Finalmente, la eficiencia de cada método se evaluó en función del tiempo necesario para coleccionar y procesar la información.

Antes de la inmersión, cada buzo debe verificar que cuenta con los equipos y materiales necesarios para tomar los datos (e.g., cámaras fotográficas, lápices, tablas, cinta métrica), y con los instrumentos de seguridad (boya de seguridad, brújula, computador de buceo o reloj y tabla de buceo). En la sesión informativa inicial los buzos y el conductor de la embarcación deben acordar el sitio, tiempo y profundidades de la inmersión, las condiciones climatológicas esperadas, y los mecanismos de comunicación entre los buzos y de los buzos con el conductor de la lancha.

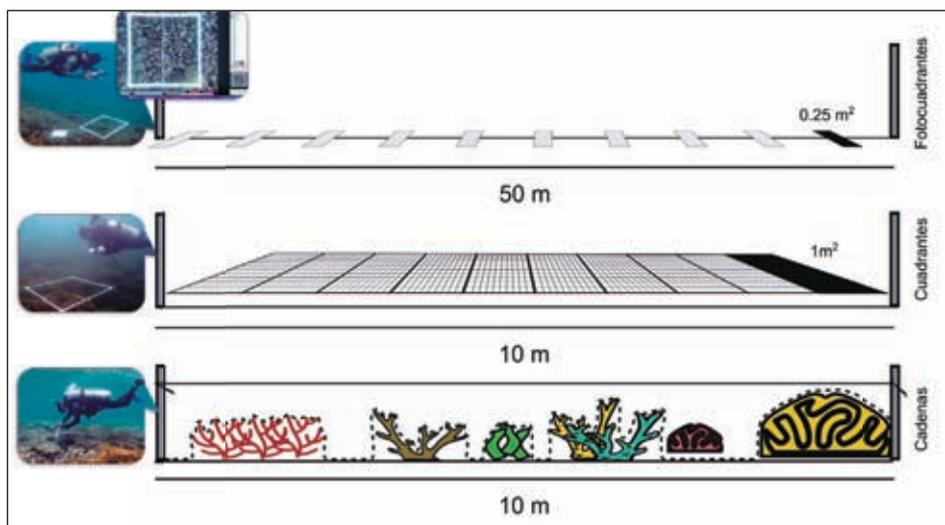
Durante la inmersión, cada buzo debe mantener contacto visual permanente con su compañero de buceo y comunicar si por algún motivo debe terminar la inmersión antes de lo planeado. Esta situación puede presentarse por problemas con los equipos de buceo o de monitoreo o por problemas de salud en el buzo. De ser posible, el buzo que continúa la inmersión puede ser asignado a otro compañero de buceo, pero bajo ninguna circunstancia debe dejarse a un buzo solo en el agua. Constantemente debe verificarse la cantidad de aire disponible en el tanque y ascender cuando el primer buzo alcance el límite de aire necesario para un ascenso seguro.

**Fotocuadrantes:** los muestreos con fotocuadrantes han sido implementados por diversas organizaciones como Conservación Internacional y la Fundación Charles Darwin<sup>7</sup>. Para su realización se delimitan transectos de 50 m de longitud con una cuerda marcada cada 5 m o con una cinta métrica. Cada 5 m, a partir del punto localizado a 5 m del inicio, un buzo toma una foto horizontal del bentos que incluya un área aproximada de 0,5 m x 0,5 m y que esté centrada sobre la línea del transecto, para un total de 10 fotocuadrantes por transecto (Fig. 1). Las imágenes son posteriormente analizadas con el programa de computador CPCe para Windows<sup>8</sup>. Para ello, se colocan 56 puntos sobre cada imagen, correspondientes a las intersecciones de una cuadrícula de 7 cm x 8 cm y se identifica el componente bentónico sobre el cual está ubicado cada punto (Fig. 1). CPCe calcula automáticamente la cobertura de cada categoría y subcategoría del sustrato, en cada imagen y en el transecto.

**Estimación visual con cuadrantes:** la estimación visual con cuadrantes ha sido implementada por organizaciones como el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI, por sus siglas en inglés)<sup>9,10</sup>. Para su ejecución se demarcan transectos de 10 m de longitud con una cuerda marcada cada metro o con una cinta métrica. La estimación de la cobertura se realiza con la ayuda de un cuadrante de 1 m<sup>2</sup>, dividido en subcuadrantes de (10x10) cm<sup>2</sup>. Un buzo ubica el cuadrante con uno de sus bordes sobre la línea del transecto y el borde opuesto orientado hacia la costa, y estima visualmente el porcentaje

de cobertura de cada componente del bentos basándonos en las fracciones que ocupan dentro de cada subcuadrante (equivalente al 1% del cuadrante). Se repite este procedimiento avanzando desde el metro 0 hasta el 9 del transecto, para un total de 10 cuadrantes por transecto (Fig. 1).

**Transecto con cadena:** los transectos con cadena han sido implementados por el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia (SIMAC) <sup>11,12</sup>. Para este método se delimita un transecto de 10 m de longitud con una cuerda amarrada a dos varillas que demarcan el inicio y el final del transecto. En la varilla inicial del transecto (0 m) se sujeta el extremo de una cadena con eslabones pequeños (~ 10 mm de largo). Previamente rotulada cada 10 eslabones con el número del eslabón para facilitar su lectura bajo el agua. La cadena se extiende a lo largo del transecto siguiendo el contorno del sustrato arrecifal y usando la línea marcada por la cuerda como guía (Fig. 1). Un buzo registra el componente del bentos presente bajo cada eslabón de la cadena y el número total de eslabones en cada transecto.



**Figura 1:** Esquema de diferentes métodos de monitoreo utilizados para el estudio de las comunidades bentónicas arrecifales.

**Toma de datos bajo el agua:** para la toma de datos con estimación visual de cuadrantes y con cadena es necesario contar con tablas de acrílico o papel resistente al agua y lápices para registrar los valores de cobertura en cada transecto. Posteriormente, esta información debe ser digitalizada en hojas de cálculo para estimar el porcentaje de cobertura de cada componente del

bentos, así como la riqueza de especies. Durante la toma de datos con fotocuadrantes es necesario registrar las fotos que corresponden a cada transecto para posteriormente procesar la información con CPCe.

**Análisis de datos:** según el método empleado, los porcentajes de cobertura de cada componente del bentos (%  $C_i$ ) se estiman como  $n_i/T*100$ , donde  $n_i$  es el número de puntos (fotocuadrantes), el área (estimación visual de cuadrantes) o el número de eslabones (cadena) en cada categoría del bentos y T es el total de puntos, área, o eslabones registrados en cada transecto.

Además de los componentes del bentos, comúnmente deben registrarse datos de "GAPs" o vacíos. En el método de la cadena estos datos corresponden a los eslabones de la cadena que no tocan algún componente del bentos. En el método de los fotocuadrantes corresponden a puntos donde no se logra la identificación del componente del bentos en el punto señalado en la foto. Estos datos son eliminados del número total de puntos (T) antes de calcular los porcentajes de cobertura. Los datos de cobertura posibilitan el cálculo de la riqueza de especies (S) equivalente al número de especies muestreadas, y el cálculo de índices de diversidad como el de Shannon-Wiener (H').

Con el método de la cadena puede estimarse la rugosidad del arrecife (R) como la longitud de cadena extendida siguiendo el contorno del relieve en el transecto (d) dividida por la longitud del transecto ( $l = 10$  m). Esta es más fácilmente interpretada con el índice de rugosidad relativa (IR) equivalente a  $1 - l/d$ <sup>13</sup>. IR cercanos a 0 son típicos de arrecifes planos o con poca estructura, mientras que la rugosidad y la complejidad topográfica se incrementan a medida que IR tiende hacia 1.

Comúnmente, los resultados de los muestreos del bentos arrecifal son utilizados para identificar cambios en la cobertura de corales en arrecifes monitoreados a través del tiempo, o para comparar el estado de diferentes arrecifes de coral o diferentes zonas arrecifales. Aunque los análisis estadísticos apropiados dependerán de las preguntas específicas del monitoreo, estos por lo general incluyen análisis de varianzas que evalúen el efecto de los sitios de monitoreo, o los cambios temporales en sitios de monitoreo permanentes. Dichos análisis son seguidos por pruebas de comparación múltiple para los factores significativos en el análisis de varianzas. Independientemente de los modelos estadísticos utilizados, los datos de cobertura son generalmente transformados con funciones como el arcoseno de la raíz cuadrada de la cobertura, con la cobertura expresada como proporción (0-1) y no como porcentaje. Dichas transformaciones se realizan para satisfacer los supuestos

de normalidad y homogeneidad de varianzas. Sin embargo, los análisis más actualizados utilizan modelos lineales generalizados (e.g., Alves et al. <sup>14</sup>).

#### *Caso de estudio*

##### *Comparabilidad, reproducibilidad y eficiencia de tres métodos de monitoreo del bentos usados en el Pacífico Oriental Tropical*

Para comparar las ventajas y desventajas de tres métodos usados para el monitoreo del bentos en arrecifes del Pacífico Oriental Tropical y examinar la viabilidad de comparar información obtenida con diferentes métodos, se establecieron seis sitios de muestreo en dos zonas del arrecife de "La Azufrada", Isla Gorgona, tres en la planicie y tres en el talud. En cada sitio se instaló un transecto paralelo a la línea de costa de 50 m de largo marcado a los 0, 20, 30 y 50 m. En cada transecto se determinó la composición y abundancia de organismos sésiles y tipos de sustrato siguiendo los tres métodos evaluados (fotocuadrantes: entre los 0 y los 50 m del transecto, cuadrantes y cadenas entre los 20 y 30 m). Para comparar la reproducibilidad de los protocolos, cada sitio fue evaluado por tres buzos, dos veces por cada uno de ellos, para un total de 18 estimaciones por sitio. El orden en que cada buzo realizó los transectos con cada metodología se eligió aleatoriamente. En cada transecto se registraron los componentes del bentos usando las mismas categorías generales: corales, algas y sustrato abiótico, dentro de las cuales se definieron como subcategorías las especies para los corales, los grupos funcionales para las algas (tapetes, calcáreas incrustantes, calcáreas erectas y frondosas) y el sustrato abiótico dependiendo del tamaño de partículas (arena: diámetro < 4 mm, cascajo: 4 mm - 30 cm, cantos: 0.3 - 1 m y roca >1 m). Finalmente, se registró el tiempo empleado por cada buzo en coleccionar, digitalizar y procesar los datos con cada método.

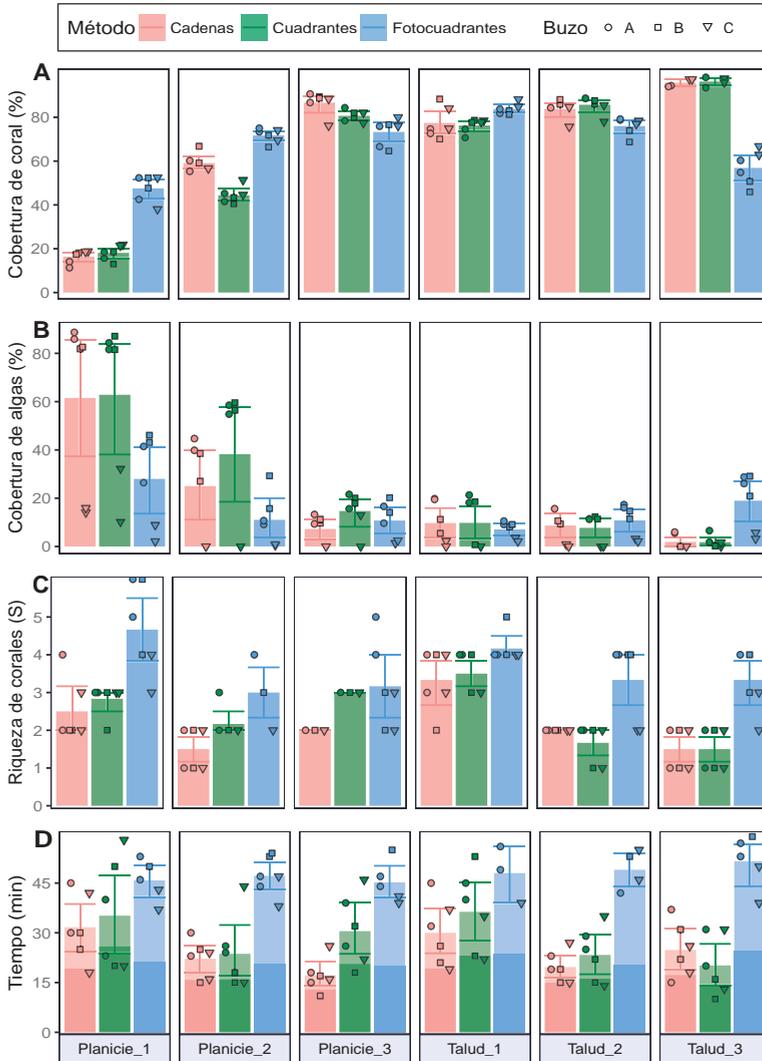
Las diferencias entre las estimaciones de cobertura de corales y algas, y entre los valores de riqueza de especies de corales obtenidos con los diferentes métodos y buzos fueron evaluados usando Modelos Lineales Generales. Los modelos incluyeron como factores de efectos fijos: zona del arrecife (planicie o talud), método de monitoreo (fotocuadrantes, cuadrantes o cadena), sitio de muestreo (3 niveles anidados dentro de cada zona) y buzo (3 niveles). Así como las interacciones entre los diferentes factores. Pruebas de comparación múltiple (Tukey,  $\alpha=0.05$ ) fueron aplicadas para las diferencias entre métodos en cada zona y entre los buzos con cada método. Los porcentajes de cobertura fueron transformados con la función arcoseno raíz cuadrada de la proporción correspondiente a la cobertura para satisfacer los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

En general se detectaron diferencias entre los métodos en la estimación de la cobertura de coral y algas, y una serie de interacciones entre método, buzo, zona y sitio que indican que las diferencias entre los métodos varían dependiendo de los buzos y de las características particulares de cada sitio de muestreo dentro de las zonas. Estas interacciones fueron más marcadas para la cobertura de algas que para la de coral, demostrando la existencia de una variedad de efectos complejos. Por ejemplo, con cuadrantes y cadena se obtuvieron estimaciones similares de la cobertura del bentos en el talud, pero se detectaron diferencias significativas en la planicie (e.g., Fig. 2, Planicie\_2). Las coberturas estimadas con fotocuantros difirieron de las realizadas con los otros dos métodos en ambas zonas. Sin embargo, no hubo un sesgo relativo de los fotocuantros hacia consistentemente sobreestimar o subestimar categorías específicas del bentos, sino que las coberturas obtenidas con fotocuantros fueron en ocasiones mayores y en otras menores a las obtenidas con los otros métodos (Figs. 2A-B, e.g., Planicie\_1 y Talud\_3). Estas diferencias posiblemente son debidas a la mayor longitud de los transectos de fotocuantros (50 m) en los que se registró una mayor heterogeneidad en la composición del bentos en comparación con los transectos más cortos de cadena y cuadrantes (10 m). La riqueza de especies con el método de fotocuantros fue mayor que la estimada con el método de la cadena tanto en la planicie como en el talud. La riqueza estimada con fotocuantros fue mayor que la estimada con cuadrantes en el talud, pero no en la planicie (Fig. 2C).

Independientemente del método empleado, los tres buzos tuvieron una buena reproducibilidad en la estimación de la cobertura de corales (Fig. 2A), pero uno de los buzos consistentemente estimó coberturas de algas significativamente menores con todos los métodos (Fig. 2B). Las diferencias entre buzos fueron más marcadas en la planicie, pues esta zona tuvo una cobertura de corales menor, y por tanto el sesgo de los buzos en la estimación de algas pudo ser mayor. Al comparar las subcategorías del sustrato se evidenció que lo que fue registrado como algas incrustantes por dos buzos, fue registrado como sustrato abiótico y generalmente cascajo, por el tercer buzo. Estas diferencias, más que reflejar problemas en la reproducibilidad de un método en particular, obedecen a la falta de consenso entre los buzos sobre la definición de las diversas categorías del bentos.

El tiempo requerido para tomar los datos de un transecto bajo el agua fue similar en los tres métodos con promedios entre los 16 y 22 minutos (Fig 2D, colores oscuros). Sin embargo, el tiempo necesario para la digitalización y procesamiento de los datos (Fig 2D, colores claros) fue mayor con el método de fotocuantros ( $30.5 \pm 0.6$  min), comparado con el método de cuadrantes ( $8.8 \pm 0.6$  min) y cadena ( $7.6 \pm 0.6$  min). El tiempo total ne-

cesario por transecto (para tomar los datos en campo y para prepararlos) fue menor con los métodos de cadena y cuadrantes (24.2 y 25.2 ± 1.7 min, respectivamente) que con el método de fotocuadrantes (52.2 ± 1.7 min).



**Figura 2:** Valores de las variables biológicas estimadas por sitio de muestreo y método (A-C) y tiempo necesario para la realización y preparación de datos de un transecto (D). Las barras representan los valores medios por método de monitoreo y sitio ± intervalo de confianza del 95%. Los puntos representan los valores individuales para cada repetición realizada por cada buzo. En el panel D las barras oscuras representan la proporción del tiempo empleado bajo el agua y las barras claras la proporción del tiempo empleado en la preparación de los datos para su posterior análisis.

## Recomendaciones

Las estimaciones de cobertura y riqueza de especies bentónicas pueden diferir cuando se emplean diferentes métodos y se realizan por diferentes buzos. Es fundamental una estandarización rigurosa de los protocolos de muestreo. El entrenamiento detallado y coordinado de los buzos puede mejorar la reproducibilidad de los métodos, pero dicho entrenamiento debe incluir todos los componentes del bentos, no sólo el coral. Cada método requiere de atención a detalles específicos como: 1) las colonias ramificadas tienden a enredarse entre las cadenas y cuadrantes con cuadrículas, por lo que dichos métodos requieren un mayor cuidado para no causar daño en el arrecife. 2) El método de cadena requiere, además de conocer las especies y categorías del sustrato, de entrenamiento del buzo sobre la manera correcta de ubicar y leer la cadena. 3) Los fotocuantros requieren práctica en el manejo de la cámara bajo el agua para que las fotos queden correctamente posicionadas y enfocadas. 4) El método de cuadrantes sólo requiere conocer las especies de coral y categorías del bentos, pues su procedimiento bajo el agua es muy sencillo. Finalmente, es recomendable conservar los métodos de monitoreo que históricamente han sido utilizados para estudiar sitios específicos, y particularmente no cambiar a nuevos métodos en los que la longitud de los transectos difiera significativamente.

### Disponibilidad de datos y código

Todos los datos y el código para el análisis de datos están disponibles en Zenodo (10.5281/zenodo.6369272) y pueden visualizarse en GitHub

([https://anampc.github.io/Metodos\\_Cobertura](https://anampc.github.io/Metodos_Cobertura))

## Bibliografía

1. Ohlhorst, S. L., Liddell, W. D., Taylor, R. J. & Taylor, J. M. Evaluation of reef census techniques. in *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium* vol. 2 319-324 (1988).
2. Rogers, C. S., Garrison, G., Grober, R., Hillis, Z.-M. & Franke, M. A. *Coral Reef Monitoring Manual for the Caribbean and Western Atlantic*. 114 (National Park Service. Virgin Islands National Park, 1994).
3. Barrera-Falcon, E., Rioja-Nieto, R., Hernández-Landa, R. C. & Torres-Irineo, E. Comparison of standard Caribbean coral reef monitoring protocols and underwater digital photogrammetry to characterize hard coral species composition, abundance and cover. *Frontiers in Marine Science* 8, (2021).

4. Dethier, M. N., Graham, E. S., Cohen, S. & Tear, L. M. Visual versus random-point percent cover estimations: "objective" is not always better. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 96, 93–100 (1993).
5. Loya, Y. Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea. *Mar. Biol.* 13, 100–123 (1972).
6. Nadon, M.-O. & Stirling, G. Field and simulation analyses of visual methods for sampling coral cover. *Coral Reefs* 25, 177–185 (2006).
7. Banks, S. *et al.* *Manual de monitoreo submareal.* (Conservación Internacional Ecuador y Fundación Charles Darwin, 2016).
8. Kohler, K. E. & Gill, S. M. Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Comput. Geosci.* 32, 1259–1269 (2006).
9. Gomez, C. G., Gonzalez, A. & Guzman, H. M. Multiscale change in reef coral species diversity and composition in the Tropical Eastern Pacific. *Coral Reefs* 37, 105–120 (2018).
10. Guzmán, H. M., Guevara, C. a. & Breedy, O. Distribution, diversity, and conservation of coral reefs and coral communities in the largest marine protected area of Pacific Panama (Coiba Island). *Environ. Conserv.* 31, 111–121 (2004).
11. Garzón-Ferreira, J., Reyes-Nivia, M. C. & Rodríguez-Ramírez, A. *Manual de Métodos del SIMAC.* (INVEMAR. Ministerio del Medio Ambiente., 2002).
12. Garzón-Ferreira, J. & Rodríguez-Ramírez, A. SIMAC: development and implementation of a coral reef monitoring network in Colombia. *Revista de Biología Tropical* 58 Suppl 1, 67–80 (2010).
13. Wellington, G. M. Depth zonation of corals in the Gulf of Panama: Control and facilitation by resident reef fishes. *Ecol. Monogr.* 52, 223–241 (1982).
14. Alves, C. *et al.* Twenty years of change in benthic communities across the Belizean Barrier Reef. *PLOS ONE* vol. 17 e0249155 (2022).

## **Estéreo-video operado por buzos: Una potente herramienta para realizar estudios comparativos de tallas de peces marinos**

---

Natalia Rivas-Escobar\*

Arturo Acero P.\*

José Tavera\*\*

---

El estudio de las tallas de los peces es fundamental para el manejo, control y protección de sus poblaciones<sup>1</sup>. La talla media ha demostrado ser un rasgo poblacional altamente operacional para la evaluación de efectos de presión pesquera sobre poblaciones ícticas<sup>2</sup>. A su vez, la identificación de dichos efectos es información base para poder presentar y ejecutar estrategias eficientes de manejo, que procuren garantizar la disponibilidad del recurso en el tiempo y así mismo su papel funcional en el ecosistema<sup>3</sup>.

El estudio de las poblaciones en su medio natural representa una ventaja en tanto permite obtener información adicional respecto a las interacciones de las especies evaluadas con el ambiente y con otras especies<sup>4</sup>. Adicionalmente, dependiendo de la o las especies, se puede obtener un mayor volumen de datos en menor tiempo<sup>4</sup>. De manera convencional, los cálculos de tallas bajo el agua se realizan por medio de censos visuales (buceo errante, transectos de banda, entre otros) donde los investigadores identifican a los individuos a nivel de especie y hacen estimación visual de sus tallas registrándolas bien sea en rangos o al centímetro más cercano posible. Una limitación de esta técnica es que se encuentra sujeta a la experticia del investigador<sup>5,6,7</sup>, marcando una pauta clave en la calidad de los datos obtenidos<sup>8</sup>.

Bajo este contexto, se hace relevante la inclusión de nuevas tecnologías en la investigación, que faciliten el ejercicio investigativo y potencien la calidad o

---

\* Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, Santa Marta, Colombia

\*\* Departamento de Biología, Universidad del Valle, Cali, Colombia

alcance de los datos obtenidos en campo<sup>9,10</sup>. La técnica óptica del estéreo-video permite, por medio de videos tomados *in situ*, identificar y calcular la talla de peces en milímetros. El nivel de precisión sobre técnicas de medición de tallas convencionales hace que la técnica sea ideal en estudios que buscan establecer diferencias en estructura de tallas de las poblaciones de peces<sup>5,6,7</sup>.

## Objetivos

En este capítulo se describe la técnica óptica de estéreo-video sumergible operado por buzo. Se realiza una breve descripción del sistema, los requerimientos de calibración y software. Así mismo, se detallan algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta durante la fase de campo y se discuten sus limitaciones.

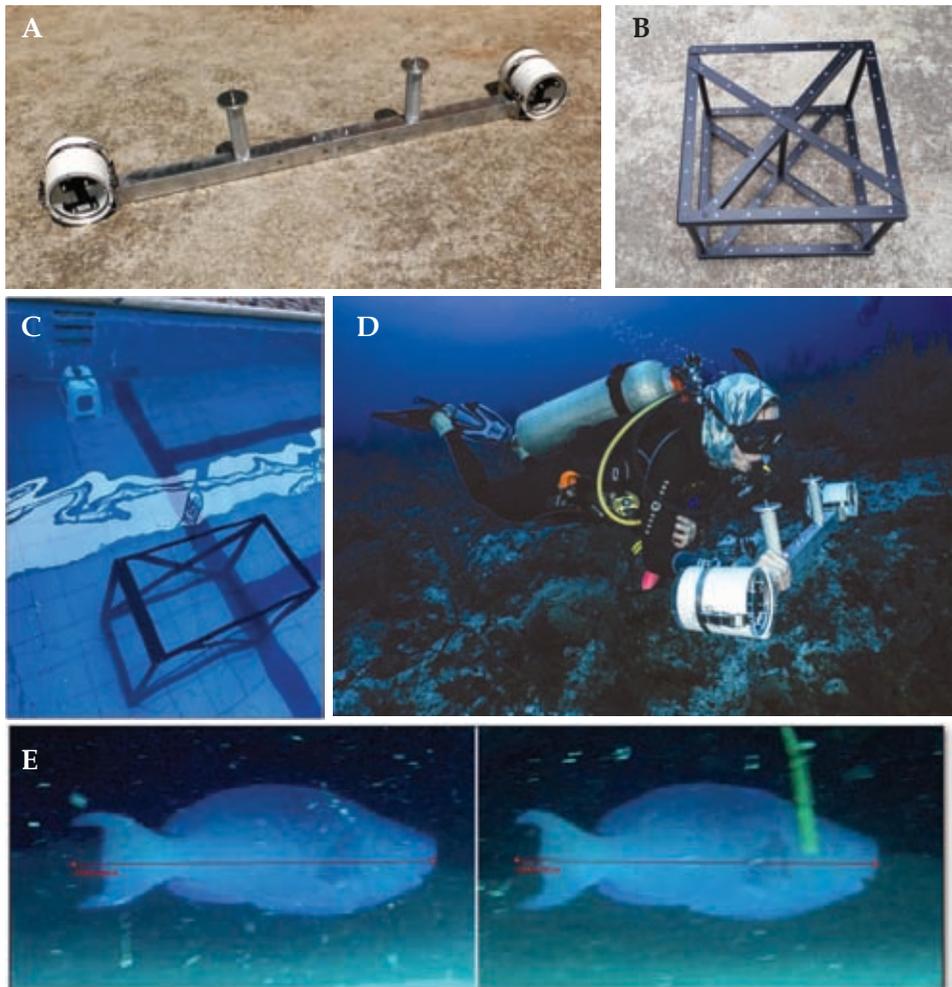
## Procedimientos mínimos de seguridad

La destreza y comodidad en el agua es fundamental para el buen desarrollo de la actividad de buceo científico. Es necesario además el conocimiento y práctica de los estándares mínimos para el buceo seguro. Se incluye bucear siempre en compañía de mínimo un compañero, usar los implementos mínimos de seguridad, como computador de buceo, elementos de señalización en superficie (p.ej. boya), elementos de llamada en superficie (p.ej. pito) y en lo posible, elementos de ubicación geoespacial (p.ej. Nautilus), sobre todo cuando se realiza la actividad en sitios remotos. Una adecuada flotabilidad es fundamental para protegerse del contacto con componentes del sustrato, evitar alterar o dañar organismos sésiles y evitar levantamiento de sedimento.

## Materiales y métodos

El estéreo-video consiste en dos cámaras dentro de carcasas sumergibles unidas a una barra base (Fig. 1A). Para generar un archivo con la posición y configuración exacta de las cámaras (que después será usado en el cálculo de las tallas), debe realizarse un proceso de calibración previo a la toma de datos en campo<sup>11</sup>. Dicha calibración se debe hacer en el agua (Fig. 1B-C) y una vez realizada, se recomienda no volver a desmontar las cámaras hasta que se hayan tomado todos los datos en campo. Si por algún motivo durante la fase de campo se tiene que desmontar una o ambas cámaras, es necesario realizar una calibración posterior al muestreo y usarla para procesar los videos tomados después de dicho evento de desmonte.

Cuando se cuenta con la configuración exacta del sistema de cámaras, la posición de cualquier punto que se elija en las imágenes va a poder ser calculada por medio de triangulación y así mismo la distancia entre dos puntos que el investigador elija en ambas imágenes. De este modo, el individuo a medir debe poder verse completamente en ambas cámaras (Fig. 1D-1E).



**Figura 1.** Equipos y consideraciones de la técnica óptica estéreo-video sumergible. [A] Estructura estéreo-video sumergible (imagen tomada de SeaGis Ltda). [B] Cubo de calibración (Imagen tomada de SeaGis Ltda). [C] Posicionamiento de estéreo-video sumergible y cubo para el proceso de calibración en piscina. [D] Buzo operando el sistema de estéreo-video sumergible y manejando flotabilidad neutra para evitar contacto con fondo y levantamiento de sedimento (imagen tomada por Santiago Estrada, 2018). [E] Posición ideal para el cálculo de talla de los individuos observados en el sistema de cámaras.

Los materiales a usar dependen del tipo de muestreo (p.ej. censos visuales errantes y/o video transectos) que se vaya a realizar, lo cual dependerá del objetivo del estudio. Por ejemplo, si se van a realizar video transectos, debe llevarse adicionalmente una cinta métrica. Se recomienda que el compañero del buzo a cargo del sistema de cámaras lleve una tabla acrílica para registrar sus observaciones, lo cual será de gran utilidad durante la fase de procesamiento de videos, sobre todo cuando se realizan estudios de comunidad con un amplio número de especies. Los datos de las tablas acrílicas y el almacenamiento de los videos se deben hacer diariamente después de la jornada de muestreo y se recomienda establecer un código para guardar cada uno de los videos donde se brinde la información necesaria para la fase siguiente de procesamiento. En dicho código se sugiere incluir: localidad, número o nombre de la estación y si se trata del video de la cámara izquierda o derecha. Debe tenerse en cuenta que, al trabajar con videos, la información a almacenar requiere de dispositivos con buen espacio de almacenamiento, incluidas las tarjetas de memoria de las cámaras y el disco duro. Se propone que al menos durante la fase de campo los videos sean almacenados en dos dispositivos diferentes para tener una copia de seguridad en caso de pérdida o daño de uno de los dispositivos.

Adicionalmente, si bien el potencial que posee el estéreo-video sumergible como herramienta para estudiar comunidades y poblaciones (que no se limitan al grupo de los peces) en su medio natural es bastante amplio. Determinar la separación de las cámaras, el tipo de cámara y el uso de implementos adicionales como luces, debe ser evaluado de acuerdo con el objeto de estudio, el área a muestrear, entre otras consideraciones. Por ejemplo, no es lo mismo muestrear en El Morro de Santa Marta a Gorgona que en San Andrés, donde la gran diferencia de visibilidad va a afectar la calidad de la imagen y la misma detección de las especies en los videos, por lo que tal vez las cámaras que sirven para el muestreo en San Andrés no sean las más adecuadas para el muestreo en Santa Marta a Gorgona. Igualmente, no es lo mismo evaluar tallas de especies pequeñas como gobios, a especies más grandes como carángidos. Si el objeto de investigación son especies muy pequeñas, es mejor manejar una distancia menor entre las cámaras para poder acercarlas más a los individuos y así lograr una adecuada identificación y captura del individuo en ambas cámaras para el cálculo de su talla.

En conclusión, el uso de la técnica de estéreo-video operado por buzo ha demostrado ser una potente herramienta para estudiar las tallas de peces obtenidas a partir del estudio de sus poblaciones en su medio natural.

Reconociendo la relación entre tallas de peces y extracción pesquera, la técnica es de especial interés para establecer diferencias en estructura de tallas de poblaciones sujetas a presión antrópica. Variaciones que tal vez no pueden ser detectadas tan fácilmente por medio de técnicas convencionales y que permiten enfocar atención y hacer un seguimiento de cambios en atributos poblacionales en el tiempo.

### Caso de estudio

#### *Variación de abundancia y talla media poblacional de peces loro en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Caribe insular colombiano*

A medida que se presenta desgaste de las poblaciones de especies comerciales y usualmente carnívoras, especies de niveles tróficos más bajos adquieren importancia para las pesquerías locales<sup>12</sup>. Esto ha sido registrado con los peces loro (Labridae: Scarinae) en diferentes localidades del Gran Caribe<sup>13,14,15,16</sup>. Y en el caso colombiano, cinco especies del grupo cuentan con categoría de amenaza asignada y asociada a la presión pesquera ejercida sobre las mismas<sup>17,18,19,20,21</sup>. Reconociendo que el interés de las pesquerías por especies e individuos grandes hace que el efecto sobre sus poblaciones sea desproporcionado<sup>14</sup> y que atributos poblacionales como abundancias y tallas pueden ayudar a evidenciar tales efectos<sup>2</sup>. Recientemente, por medio de estéreo-video operado por buzo, se buscó establecer diferencias para ambas métricas sobre las poblaciones de once especies de peces loro en arrecifes coralinos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina<sup>22</sup>. En 64 buceos y alrededor de 20 días de muestreo efectivo, el estudio registró 6625 individuos de peces loro, obteniendo datos de talla para 6025 de ellos, dando una idea del volumen de datos que se puede obtener en un periodo corto de tiempo en campo. Los resultados encontrados en la isla de San Andrés para las especies *Scarus vetula* y *Sparisoma viride*, catalogados como CASI AMENAZADAS, concuerdan con aquellos encontrados por estudios previos en distintas localidades del Gran Caribe y relacionados con mayor presión pesquera. Ambas especies presentaron disminución de tallas respecto a las encontradas a menos de 30 km de distancia de la isla de San Andrés, en los Cayos Bolívar y Albuquerque y a 90 km en las islas de Providencia y Santa Catalina. Por su parte, las especies pequeñas *Scarus iseri* y *S. taeniopterus* presentaron mayores abundancias y tallas a mayor presión pesquera, lo cual fue sugerido como un efecto indirecto de las pesquerías (Rivas et al, 2022). El monitoreo de las poblaciones en el tiempo, usando la herramienta estéreo-video, permitirá hacer un seguimiento a los cambios encontrados en sus tallas y abundancias (Fig. 2).

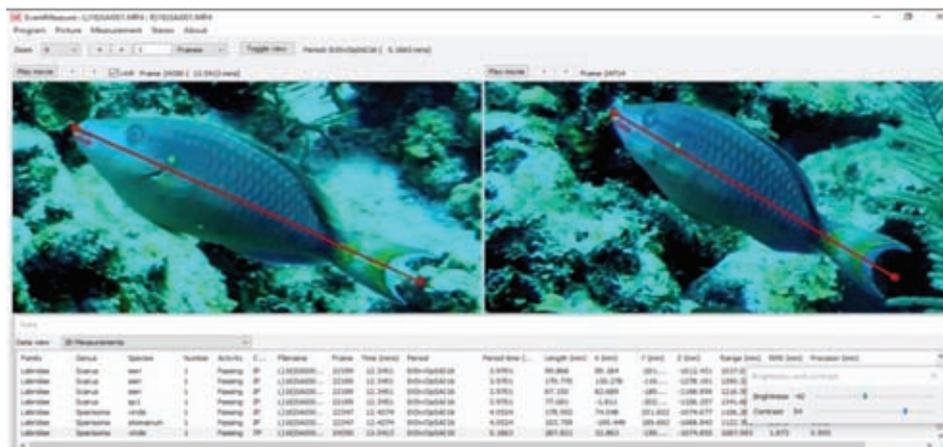


Figura 2. Individuo de *Sparisoma viride*. Longitud total medida con el software especializado Event Measure de Seagis.

## Recomendaciones

El uso del sistema sumergible de estéreo-video constituye una poderosa herramienta; sin embargo, como en cualquier área de las ciencias biológicas, se recomienda siempre prestar mucha atención a la identificación taxonómica de las especies. Así mismo, se recomienda tener en cuenta hasta las más simples consideraciones en el momento de planificar la toma y el manejo de los datos durante la fase de campo, ya que esto facilitará la fase posterior al muestreo y potenciará el uso del estéreo-video como técnica en el buceo científico.

## Bibliografía

1. Audzijonyte, A., Kuparinen, A., Gorton, R. & Fulton, E., A. *Ecological consequences of body size decline in harvested fish species: positive feedback loops in trophic interactions amplify human impact*. Biol. Lett. 2013; 92012110320121103 <http://doi.org/10.1098/rsbl.2012.1103>
2. Rochet, M-J. & Trenkel, V. *Which community indicators can measure the impact of fishing? A review and proposals*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2003; 60: 86- 99.
3. Jennings, S. & Kaiser, M. J. *The effects of fishing on marine ecosystems. Advances in Marine Biology*. 1998; 34: 201-352.
4. Dolloff, C., A., Kershner, J. & Thurow, R. *Underwater observation*. En: Murphy, B., R. & Willis, D., W. editors. *Fisheries techniques*, 2<sup>nd</sup> edition. Maryland: American Fisheries Society; 1996. p. 533-554.

5. Bower, M. R. et al. *Accuracy and precision of visual estimates and photogrammetric measurements of the length of a small-bodied fish*. NA J. Fish. Manag. 2011; 31(1): 138-143.
6. Harvey, E., S., Fletcher, D. & Shortis, M., R. *A comparison of the precision and accuracy of estimates of reef-fish lengths made by divers and a stereo-video system*. Fishery Bulletin. 2011; 99: 63-71.
7. Harvey, E., Fletcher, D. & Shortis M. *Estimation of reef fish length by divers and by stereo-video: a first comparison of the accuracy and precision in the field under operational conditions*. Fisheries Research. 2002; 57:255-265.
8. St. John, J., Russ, J., R. & Gladstone, W. *Accuracy and bias of visual estimates of numbers, size structure and biomass of a coral reef fish*. Marine Ecology Progress Series. 1990; 64: 253-262.
9. Vokoun, J., C., Rabeni, C., F. & Stanovick, J., S. *Sample-size requirements for evaluating population size structure*. North American Journal of Fisheries Management. 2001; 21: 660-665.
10. Quist, M. C., Bonvechio, K. I & Allen, M. S. *Statistical analysis and data management*. En: Bonar, S. A., Hubert, W. A. & Willis, D., W. Editores. Standard methods for sampling North American freshwater fishes. Maryland: American Fisheries Society. 2009. p. 171-194.
11. Shortis, M., R., & Harvey, E., S. *Design and calibration of an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna populations*. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing. 1998; 32:792-799.
12. Taylor, B., M., Houk, P., Russ, G., R. & Howard, J., C. *Life histories predict vulnerability to overexploitation in parrotfishes*. Coral Reefs. 2014; 33: 869-878.
13. Hawkins, J., P. & Roberts, C., M. *Effects of artisanal fishing on Caribbean coral reefs*. Cons. Biol. 2004; 18(1):215-226.
14. Mumby, P., J. et al. *Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs*. Science. 2006; 311(5757): 98-101.
15. Passley, D., Aiken, K. & Perry, G., A. *Characterization of the Jamaican spearfishing sector*. Proc. Gulf Car. Fish. Inst. 2010; 62: 235-240.
16. Vellés, H. & Oxenford, H., A. *Parrotfish size: A simple yet useful alternative indicator of fishing effects on Caribbean reefs?* PLoS One. 2014; 9 (1): e86291.
17. Acero, P., A., Bolaños-Cubillos, N., Polanco F., A. & González, J., D. *Scarus guacamaia Cuvier, 1829*. En: Chasqui V., L. et al. editores. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2017. p. 91-95.
18. Bolaños-Cubillos, N. et al. *Sparisoma viride Bonnaterra, 1788*. En: Chasqui V., L. et al. editores. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2017. p. 333-337.

19. Bolaños-Cubillos, N. *et al.* *Scarus coelestinus Valenciennes, 1840*. En: Chasqui V., L. *et al.* editores. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2017. p. 81-85.
20. Bolaños-Cubillos, N. *et al.* *Scarus coeruleus Edwards, 1771*. En: Chasqui V., L. *et al.* editores. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2017. p. 86-90.
21. Bolaños-Cubillos, N. *et al.* *Scarus vetula Bloch y Schneider, 1801*. En: Chasqui V., L. *et al.* editores. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2017. p. 328-332.
22. Rivas, N., Acero, P., A. & Tavera, J. Spatial variation of parrotfish assemblages at oceanic islands in the western Caribbean: evidence of indirect effects of fishing? PeerJ. 2022; 10:e14178 <https://doi.org/10.7717/peerj.14178>

## Técnicas letales y no letales para el estudio de peces marinos en Colombia

---

Alejandra Puentes-Sayo\*  
Natalia Rivas-Escobar\*  
Arturo Acero P.\*  
Olga Torres-Suárez\*\*  
José Tavera\*\*

---

### Introducción

Los peces son un componente fundamental de los ecosistemas marinos. Sus diferentes aspectos morfológicos, fisiológicos, ecológicos y comportamentales<sup>1</sup>, ofrecen diversas y fascinantes formas de estudio. Estos organismos habitan ecosistemas heterogéneos: arrecifes coralinos, praderas de pastos marinos, bosques de manglar, fondos blandos y costas rocosas<sup>2</sup>, y exhiben una gran variedad de estilos de vida y tamaños. América tropical presenta una alta biodiversidad íctica, representada en organismos tanto del Pacífico Oriental Tropical como del mar Caribe<sup>3</sup>, por lo que el estudio de peces marinos en Colombia es de gran importancia para el conocimiento de su biodiversidad y para llevar a cabo una efectiva gestión y conservación de las especies.

En el campo de la ictiología, existen diferentes metodologías que permiten el estudio de peces por medio del buceo científico. De acuerdo con el objetivo de investigación, se debe recurrir a la colecta de individuos o de información *in situ*.

### Objetivos

En este capítulo se describen algunas técnicas para el estudio de los peces marinos. Se exponen métodos letales que permiten la colecta de individuos para

---

\* Universidad Nacional de Colombia, sede Caribe. Santa Marta, Colombia

\*\* Departamento de Biología. Universidad del Valle. Cali, Colombia

abordar preguntas taxonómicas, morfológicas y genéticas, al igual que métodos no letales que permiten llevar cabo un seguimiento *in situ* de la diversidad y estructura de la comunidad íctica en diferentes ecosistemas de interés.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Si las actividades subacuáticas se realizan desde un bote, este debe contar con un kit de oxígeno y de primeros auxilios. Se debe tener un conocimiento previo del área de estudio para la identificación de procedimientos de emergencia como números de contacto y centros de atención en salud cercanos. Preferiblemente, contar con exámenes médicos que certifiquen un buen estado de salud para el desarrollo de las actividades planteadas. Los buzos deben ser avanzados y/o contar con al menos 30 inmersiones. Se recomienda el uso de una boya de superficie inflable que debe ser desplegada durante la salida de la inmersión para el regreso al bote o a la orilla. Todos los buzos deben contar con un computador de buceo y mantenerse bajo los límites de no descompresión indicados por el mismo. Adicionalmente, se recomienda el uso de traje y guantes como protección térmica y para evitar el contacto con superficies cortantes y organismos urticantes. Nunca se debe bucear solo.

## **Materiales y métodos**

### *Técnicas letales*

Con el fin de llevar a cabo la identificación precisa de algunas especies, realizar estudios taxonómicos (morfológica y genética) y responder preguntas ecológicas, evolutivas y biogeográficas de los peces costeros, se requiere la recolecta de ejemplares en campo<sup>4</sup>. Dentro de los métodos aplicados para la captura de peces se pueden mencionar el arpón, las capturas manuales, el uso de redes sumergibles y las bombas de succión. El comportamiento de la especie de estudio, sus características morfológicas y el hábitat en el que se encuentra son los factores que influyen en la eficiencia de los métodos de muestreo y definen la técnica más apropiada para su captura<sup>5</sup>.

- Arpón mecánico y arpón hawaiano

El arpón es un arte de pesca de gran efectividad para la captura activa de peces. Esta técnica es selectiva de las tallas y especies de interés e involucra la persecución dirigida de la especie objetivo. Una vez el individuo es identificado, el arpón es disparado desde una distancia relativamente corta, haciendo uso de un proyectil metálico<sup>6</sup>. El arpón automático es disparado al tirar

de un gatillo que se encuentra en la empuñadura (Fig. 1 A), mientras que el mecanismo del arpón hawaiano consiste en bandas elásticas insertadas en el extremo de una vara, las cuales, al ser estiradas y aprovechando la fuerza del brazo del buzo, son liberadas en dirección del ejemplar de interés (Fig. 1 B). Posterior a su captura, los individuos deben ser guardados en mallas, nasas de buceo o bolsas plásticas. Se recomienda no realizar este tipo de pesca en áreas con presencia de tiburones.

- Capturas manuales

Las capturas manuales pueden ser llevadas a cabo en peces pequeños y de poca agilidad. Estas características permiten la aproximación de los buzos a la especie sin ser percibidos con facilidad y posteriormente con ayuda de las manos y/o bolsas plásticas transparentes los peces son acorralados y capturados (Fig. 1 C y D). Estas capturas vienen normalmente acompañadas del uso de aceite de clavo u otras sustancias analgésicas que se emplean para adormecer los individuos y hacer la captura más exitosa; igualmente, esta alternativa permite conservar los especímenes vivos y preservar su color por un periodo de tiempo prolongado, lo cual facilita su estudio y posterior identificación<sup>7,8</sup> (Fig. 1 E)

- Redes sumergibles

La captura de peces arrecifales con red de pesca sumergible se lleva a cabo con un paño de red monofilamento de tamaño pequeño (dimensiones: longitud 8m, alto 1,5m, ojo de malla 6,5% que equivale entre 1,3 y 1,9 cm), provisto de pequeñas boyas insertadas en la línea superior y por pequeños plomos en la línea inferior (Fig. 1 F y G), que permiten su fácil extensión en el agua. Durante la inmersión, el calado de la red se realiza una vez se localizan las especies objeto de captura y el dispositivo debe desplegarse en un área libre de obstáculos para evitar que se enrede y rasgue. Dependiendo de la movilidad de la especie de interés, entre uno y cuatro buzos pueden participar en la captura con este dispositivo: uno de ellos debe estar atento a los individuos que se enmallan para asegurarlos en nasas y para liberar aquellos especímenes que no sean de interés; mientras que los otros buzos ayudan a guiar o acorralar los individuos hacia la red, la cual, al ser de nylon, no es fácilmente detectable por los peces. Una vez se hayan completado las capturas se recoge la red desde la parte superior y en orden, limpiando la malla de algas, pastos marinos o escombros de coral que pudieron haber quedado enredados durante su despliegue. Posterior al buceo, en el bote, los individuos capturados se sumergen en una solución anestésica [metasulfonato de tricáina MS-222,

Tricaine-S, Western Chemical Inc. Aprobada por la FDA (Food and Drug Administration, por sus siglas en inglés)], para el manejo de peces<sup>9</sup>, en una concentración de 100 mg/l para anestesiarse con una dosis letal a los organismos de estudio.



**Figura 1. Técnicas letales.** A) Uso de arpón automático, captura del pez león *Pterois volitans* con elementos de protección en manos; B) uso de arpón hawaiano; C y D) capturas manuales con ayuda de bolsas plásticas. Foto: Alfonso Ortiz, 2018. E) Ejemplar fresco de *Elacatinus louisae* posterior a colecta con aceite de clavo; F) red sumergible extendida y nasa de colecta; G) pez capturado con red sumergible en el arrecife; H) bomba de succión usada sobre el fondo, Foto: Þorbjörnsson *et al.* (2018).

- Bombas de succión

Este método consiste en un sistema de bombeo que puede ser usado para succionar agua o sedimentos que, luego de pasar a través de un conducto, son filtrados o separados para la obtención de los especímenes de interés<sup>10</sup>. Pueden ser operadas por uno o dos buzos y son ideales para muestreos en el ambiente bentónico<sup>11</sup> (Fig.1 H). En general, esta técnica sirve para la colecta de grupos específicos, ya que permite la captura de peces de pequeño tamaño que viven dentro de galerías en los fondos blandos o que presentan poca movilidad y se posan en el fondo, siendo fácilmente aspirados.

### *Técnicas no letales*

Estas técnicas proporcionan información sobre diversos aspectos como la abundancia, talla y diversidad de las especies. Componentes esenciales para estudios destinados a detectar cambios en los ensamblajes de peces marinos a través del tiempo y el espacio<sup>12</sup>. Las técnicas no letales permiten caracterizar poblaciones y comunidades ícticas in-situ, lo cual es fundamental para reconocer su estado y sus tendencias<sup>5</sup>.

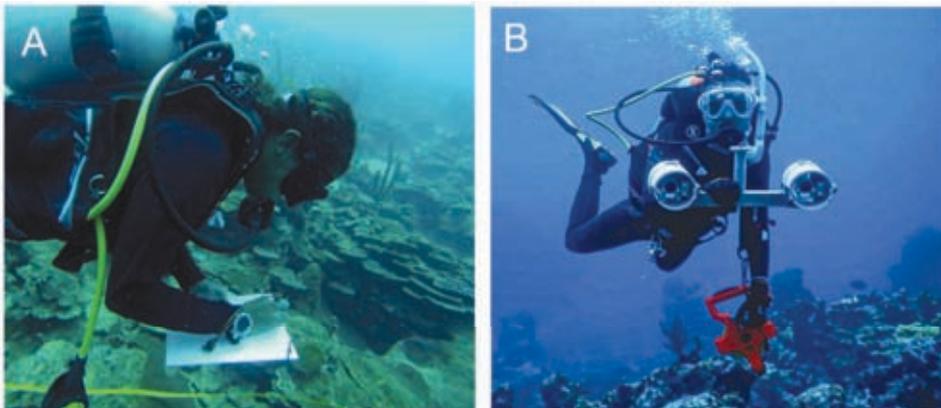
- Censos visuales

Esta técnica se usa comúnmente para evaluar la riqueza, abundancia y distribución de especies en relación con hábitats disponibles, al igual que para hacer estimaciones de tallas<sup>13</sup>. Permite obtener información de organismos conspicuos en el ecosistema, pudiendo subestimar especies pequeñas, crípticas o de hábitos nocturnos<sup>14</sup>. En campo deben usarse tablas acrílicas y lápices para la toma de datos bajo el agua. Dentro de los censos visuales se puede realizar la evaluación por medio de buceo errante, cilindros de muestreo o por medio de transectos de banda<sup>10</sup>, donde básicamente una pareja de buzos realiza el censo dentro de un transecto con una longitud y un ancho definidos. Por medio de los transectos de banda es posible el cálculo de densidades, composición de las poblaciones, tallas y preferencia de hábitat de ensamblajes de peces. Aunque posee una gran replicabilidad y poder de comparación espacial, esta técnica, al igual que otras metodologías usadas dentro de censos visuales, depende de la experticia del investigador para la identificación, conteo y estimación visual de las tallas de los peces<sup>7</sup>, lo cual representa sin duda un sesgo importante.

- Sistema estéreo-video operado por buzo

Esta técnica óptica de gran acogida para el estudio de tallas en peces consta de dos cámaras fijas que graban simultáneamente y están separadas a una

distancia determinada. Las imágenes obtenidas con el sistema permiten el cálculo de tallas de los individuos y especies de interés por medio de programas especializados y pueden implementarse las mismas técnicas mencionadas en el párrafo anterior (Ver capítulo “Estéreo video sumergible: Una potente herramienta para establecer diferencias en tallas de peces”). Una ventaja frente a los censos visuales convencionales es que la experticia del investigador no juega un papel tan relevante en la calidad de los datos obtenidos en campo, sin embargo, requiere de un trabajo exhaustivo posterior a la fase de campo, incluyendo la experticia de un taxónomo, por lo que debe evaluarse muy bien su pertinencia y potencial de acuerdo con la pregunta de investigación que se quiera abordar<sup>15</sup>.



**Figura 2. Técnicas no letales.** A) Censo visual con transecto desplegado en arrecife; B) video transectos usando el sistema de estéreo-video operado por buzo.

*Estudio de peces arrecifales en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina en el marco de las expediciones científicas Seaflower*

Como parte de los esfuerzos realizados por la Comisión Colombiana del Océano y diferentes instituciones públicas y privadas del país, desde 2015 se ha participado en las Expediciones Científicas Seaflower, con el fin de estudiar la comunidad íctica de diferentes islas y cayos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

En el marco de estas expediciones se han evaluado los ensamblajes de peces marinos por medio de diferentes técnicas de captura (arpón, capturas manuales y redes sumergibles) que han permitido la identificación taxonómica a nivel morfológico y genético de diferentes especímenes y la obtención de nuevos registros para las islas e incluso para la Reserva de la

Biosfera Seaflower. Así mismo, se han implementado censos visuales tanto con buceo errante como con transectos de banda y se ha usado la técnica óptica de estéreo-video que ha permitido tener información sobre tallas de especies amenazadas y de interés comercial.

Debido a la naturaleza de las expediciones, en el corto tiempo disponible para muestreo en campo el uso de las diferentes técnicas mencionadas potencia la obtención de información y la colecta de los especímenes necesarios.



**Figura 3. Muestreos de peces durante la Expedición Científica Seaflower 2021-I Providencia y Santa Catalina.** A) Buzos mostrando posición ideal para las capturas manuales, flotabilidad neutra, sin apoyar aletas en el fondo. B) Buzo grabando con el sistema estéreo-video para obtención de tallas de peces. Foto: Santiago Estrada, 2019. C) Búsqueda de especies de interés para capturas con arpón automático.

## Recomendaciones

Debido a la variedad de especies que componen la ictiofauna marina, es necesario tener en cuenta aspectos de su estilo de vida, comportamiento, tamaño y formas, para el apropiado uso de las técnicas mencionadas. Se espera que el uso de estas sea una herramienta para obtener información acerca de la diversidad de peces y de sus características a lo largo del Caribe y Pacífico colombianos.

## Bibliografía

1. Mora, C. *Ecology of Fishes on Coral Reefs*. Cambridge University Press. University of Hawaii at Manoa, USA (2015).
2. Robertson, D.R. y Cramer, K.L. Defining and dividing the Greater Caribbean: Insights from the biogeography of shorefishes. *PLoS One*, 9(7), e102918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102918> (2014).
3. Polanco, A., Foop, F., Albouy, C., Brun, P., Boschman, L. y Pellissier, L. Marine fish diversity in tropical America associated with both past and present envi-

- ronmental conditions. *Journal of Biogeography*, 47(12): 2597–2610. doi:10.1111/jbi.13985 (2020).
4. Robertson, D.R. y Smith-Vaniz, W.F. Rotenone: An essential but demonized tool for assessing marine fish diversity. *BioScience*, 58(2): 165–170 (2008).
  5. Caldwell, Z.R., Zgliczynski, B.J., Williams, G.J. y Sandin, S.A. Reef fish survey techniques: assessing the potential for standardizing methodologies. *PLoS ONE*, 11(4): e0153066. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153066> (2012).
  6. FAO. *Orientaciones técnicas de FAO para la pesca responsable N° 4: La ordenación pesquera*. Capítulo 2: Uso de medidas técnicas en la pesca responsable: regulación de artes de pesca. FAO Documento Técnico de Pesca, No. 424. Roma, FAO (2005).
  7. Javahery, S., Nekoubin, H. y Haji, A. Effect of anesthesia with clove oil in fish (review). *Fish Physiology and Biochemistry*, 38: 1545–1552 (2012).
  8. Ackerman, J.L. y Bellwood, D.R. Comparative efficiency of clove oil and rotenone for sampling tropical reef fish assemblages. *Journal of Fish Biology*, 60: 893–901. doi:10.1006/jfbi.2002.1891 (2002).
  9. Cho, G.K. y Heath, D.D. Comparison of tricaine methanesulphonate (MS22) and clove oil anaesthesia effects on the physiology of juvenile chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha* (Walbaum). *Aquaculture Research*, 31: 537–546 (2000).
  10. INVEMAR. *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales*. INVEMAR y Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH. Santa Marta, Colombia. 1–230 (2013).
  11. Porbjörnsson, J.G., Ólafsdóttir, J.H. y Kristjánsson, B.K. Diver-operated manual suction pump sampler: a reliable method for sampling benthos on rock substrates. *Aquatic Biology*, 27: 87–92 (2018).
  12. Costello, M.J. *et al.* Methods for the study of marine biodiversity. In: *The GEO Handbook on Biodiversity Observation Networks*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27288-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27288-7_6) (2017).
  13. Anderson, M. J. y Millar, R. B. Spatial variation and effects of habitat on temperate reef fish assemblages in northeastern New Zealand. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 305, 191–221. doi:10.1016/J.JEMBE.2003.12.011 (2004)
  14. Edgar, G. J., Barrett, N. S. y Morton, A. J. Biases associated with the use of underwater visual census techniques to quantify the density and size-structure of fish populations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308: 269–290. doi:10.1016/J.JEMBE.2004.03.004 (2004)
  15. Langlois, T. J., Harvey, E. S., Fitzpatrick, B., Meeuwig, J. J., Shedrawi, G. y Watson, D. L. Cost-efficient sampling of fish assemblages: comparison of baited video stations and diver video transects. *Aquatic Biology*, 9: 155–168 (2010).

## Técnicas para el marcaje de tiburones mediante buceo en el Pacífico colombiano

---

Sandra Bessudo\*  
Felipe Ladino Archila\*

---

El estudio de especies marinas como los tiburones y peces pelágicos, supone grandes retos debido a las limitaciones de hacer un seguimiento continuo a individuos específicos, lo que impide conocer gran parte de sus ciclos de vida<sup>1</sup>. Por este motivo, el marcaje de animales se ha convertido en una gran alternativa para estudiar la ecología y biología de las especies marinas. El primer registro de marcaje en animales marinos data de 1653, cuando Isaak Walton marcó a juveniles de salmones (*Salmo solar*) en el atlántico para determinar los ríos en que los salmones retornaban tras su fase marina<sup>2,3</sup>. Los estudios de marcaje en tiburones comenzaron hasta mediados de 1930. No obstante, estos marcajes se realizaban tras pescar al animal. Fue hasta 1985 cuando se incorporaron las primeras etiquetas, que se podían implantar mediante buceo o apnea, con el objetivo de reducir el estrés del animal ocasionado por la captura mediante la pesca de marcaje<sup>4</sup>. Las primeras etiquetas usadas fueron las tipo spaghetti que venían siendo usadas en atunes y otros peces pelágicos<sup>3</sup>. A finales de los noventa se desarrollaron las primeras etiquetas de telemetría acústica y satelital que evolucionarían a las etiquetas de hoy en día.

Gracias al marcaje se han logrado identificar rutas migratorias, zonas de agregación y residencia, entre otros patrones que han sido claves para la designación de áreas marinas protegidas. En este capítulo se explica el proceso de marcaje y las consideraciones a tener en cuenta. También se explican los tipos de etiquetas usadas actualmente. Se recomienda que esta actividad se

---

\* Fundación Malpelo y Otros Ecosistemas Marinos, Bogotá, Colombia.

realice por personas entrenadas y con experiencia en la interacción con este tipo de fauna.

Antes de iniciar el procedimiento se debe definir si se va a realizar mediante apnea o mediante buceo autónomo. En ningún caso se pueden mezclar los métodos. La actividad se desarrollará por un líder y una persona de soporte, se puede contar con más personas de soporte, pero eso puede incidir en que la fauna se haga esquiva, por lo que lo ideal, es con dos personas. Ambas personas deben ser buzos o apneistas avanzados y deben contar con todo el equipo básico de buceo, junto con sus boyas de seguridad y localizador satelital (nautilus), de igual forma deben contar con un bote de apoyo. El líder debe tener experiencia en la interacción con este tipo de fauna siendo capaz de discernir si un tiburón puede o no ser marcado. Todas las especies difieren en su susceptibilidad al estrés y en su respuesta frente a distintos estímulos<sup>5,6</sup>.

Se debe tener en cuenta el código de prácticas de marcaje para animales marinos: COP (Code Of Practice for tagging marine animals, por sus siglas en inglés). Y se debe contar con un permiso de manipulación de fauna por parte de las autoridades correspondientes. Con este método NO se pueden marcar tiburones menores a un metro de longitud, porque es probable que se les causen heridas fatales.

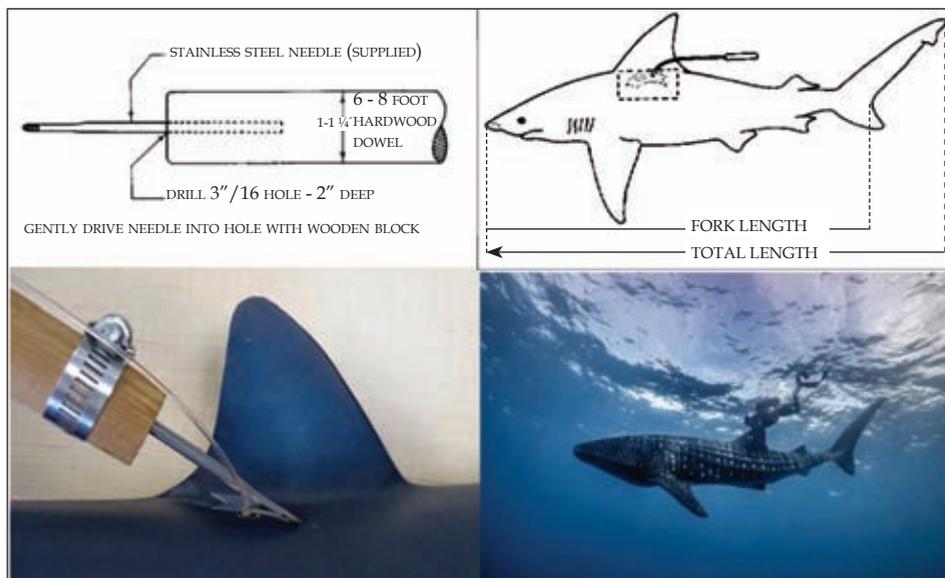
El equipo de marcaje, en especial los anclajes y las puntas que estarán en contacto con el animal, se deben mantener en buen estado higiénico y deben ser desinfectadas con alcohol o fuego, antes de cada procedimiento. Por último, las marcas de telemetría deben contar con recubrimiento antiincrustante (*antifouling*), para evitar que le crezcan bálanos u otros organismos, afectando al animal etiquetado.

El objetivo de este capítulo es describir los aspectos a tener en cuenta en el marcaje de tiburones mediante buceo autónomo o apnea, así como describir los principales tipos de etiquetas usadas con sus pros y contras, en el estudio de patrones de movimiento y de ecología de tiburones.

## **Materiales y métodos**

No todos los tipos de marcas ni todas las metodologías de marcaje son válidas en todas las especies de tiburones, de modo que se deben tener en cuenta factores como: objetivo del programa de marcaje, duración de la etiqueta (*tag*), facilidad de aplicación, presupuesto del programa de marcaje, efectos de la etiqueta en el tiburón, tamaño de los individuos marcados, tamaño de la muestra y tipo de cooperación requerida para la recuperación de las marcas<sup>3,4,7</sup>.

El equipo principal de marcaje es el aplicador, que se compone de una punta y un pasador. La punta debe ser de acero inoxidable y consta de una especie de aguja con una ranura en la punta, donde se sujeta el ancla de la etiqueta. El pasador debe ser de un material duro, recomendamos el acero inoxidable o la madera de alta densidad y debe tener un ancho de por lo menos 2.5 cm. La función del pasador es sujetar firmemente la punta y evitar que esta última entre más de lo necesario al bloquearse con la piel del tiburón. La punta debe sobresalir al menos 7 cm desde el pasador<sup>8</sup> (Figura 1).



**Figura 1.** En la primera imagen se muestra un modelo de aplicador y aguja con la que se inserta el ancla de la etiqueta. La segunda y tercera imagen representan la etiqueta con su anclaje y la zona del tiburón donde debe insertarse. La última imagen muestra un procedimiento de marcaje de un tiburón ballena en el SFF Malpelo. Imágenes 1,2,3 – NOAA Fisheries; Imagen 4 – Sandra Bessudo / Fundación Malpelo. Procedimiento de marcaje de un tiburón ballena en el SFF Malpelo. (Foto: Sandra Bessudo / Fundación Malpelo).

El ancla de la etiqueta es una especie de cuchilla curvada en el mismo sentido en ambos extremos, de esta forma logra penetrar la piel e insertarse y mantenerse dentro de la musculatura de la base de la aleta dorsal del animal. Las etiquetas deben insertarse en el músculo de la espalda cerca de la primera aleta dorsal en ángulo hacia la cabeza del tiburón. Esta ancla se inserta dentro del animal mediante un arpón o preferiblemente con una vara hawaiana.

El primer paso es identificar la zona donde se realizará el marcaje, luego se prepararán y desinfectarán los materiales a utilizar. Se recomienda que la etiqueta se monte bajo el agua y que se asegure con un caucho elástico para evitar su pérdida<sup>6</sup>. Cuando se identifique el animal, el trabajo del buzo de soporte es anotar la mayor información posible del animal. Mientras el buzo marcador se aproxima al tiburón, idealmente desde arriba, una vez este a menos de un metro para que apunte a la base de la primera dorsal con las curvas del ancla mirando hacia el animal, y cuando este en alcance, dispare el aplicador. La punta del ancla se insertará entre 2.5 cm y 3.5 cm debajo de la piel del tiburón. En la mayoría de los casos el tiburón huye rápidamente, por lo que tras el marcaje se debe tomar distancia para evitar ser golpeado por la cola del tiburón.

Recientemente se han estado probando metodologías de marcaje menos invasivas, como ganchos que se adhieren a la aleta dorsal del tiburón<sup>1,9</sup>. Sin embargo, hasta el momento sólo han sido eficientes para periodos de marcaje cortos, por lo que aún no son una alternativa si lo que se desea estudiar son patrones migratorios de largo plazo.

### **Etiquetas visuales**

Las etiquetas visuales tienen forma de spaghetti y llevan impreso un código de identificación y el nombre de la entidad que instaló las etiquetas, junto con el correo electrónico y número de contacto. Las etiquetas visuales son de bajo costo, sin embargo, el éxito del estudio depende en gran medida de la cantidad de marcas instaladas y la cooperación con las pesquerías locales, ya que dependen de las recapturas para obtención de los datos.

### **Etiquetas acústicas**

Estas etiquetas corresponden a transmisores que envían un código numérico cada determinada cantidad de tiempo. En la actualidad hay etiquetas de todos los tamaños, pero para este tipo de marcaje de tiburones grandes se usan el tipo V16, las cuales duran más de 5 años. Del otro lado, se necesitan receptores que capten las señales de las marcas, los cuales son instalados en un peso muerto atado a una boya entre 10 y 30 metros de profundidad. Estos receptores almacenan la información por hasta un año, momento en el que se debe ir por ellos para sacarlos y descargar la información. Estas etiquetas son costosas al igual que los receptores, pero existen redes de cooperación como MigraMar, que cuentan con decenas de receptores instalados en el Pacífico Este Tropical.

## Etiquetas satelitales

Las etiquetas satelitales cuentan con un sistema de posicionamiento a través de sensores de luz o por GPS, para el pacífico colombiano recomendamos el uso de las que se posicionan por GPS, no obstante, estas marcas sólo funcionan en animales que se acercan a la superficie a menos de 1 metro, que es cuando envían al satélite la información de su ubicación y un resumen de parámetros preestablecidos. Por el costo de las etiquetas, junto al tiempo de satélite hacen de esta metodología la más costosa, sin embargo, es muy probable que cada etiqueta provea mucha información directamente a la plataforma de satélite que estemos usando.

### Caso de estudio

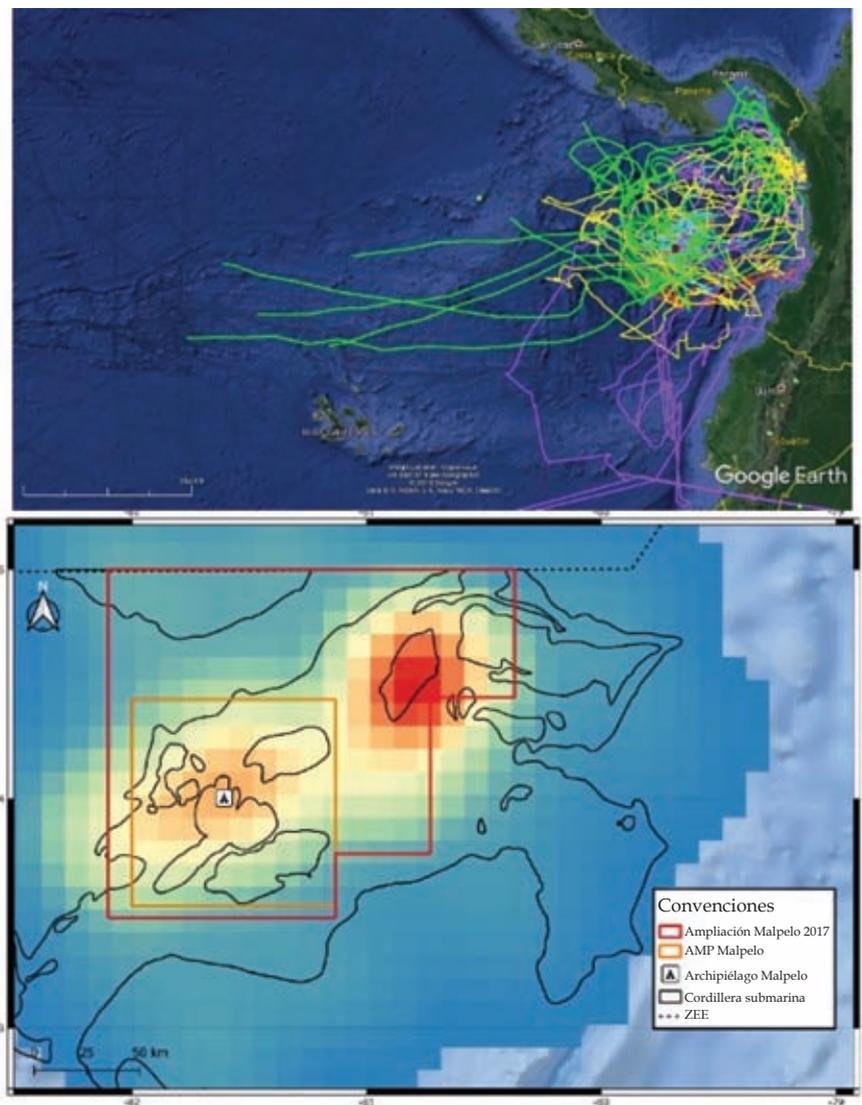
#### *Patrones de movimiento de algunas de las especies de tiburones en el Santuario de Fauna y Flora de Malpelo*

El santuario de fauna y flora de Malpelo fue creado en el año 1995 con el objetivo de conservar la gran diversidad de fauna que alberga. Siendo los tiburones y otros grandes pelágicos, los principales objetivos de conservación. Los límites del área marina protegida se han ido ampliando continuamente a medida que se logra obtener mayor información sobre los ciclos de vida y la ecología de las especies objeto de conservación. El año 2006 se dio inicio al marcaje con etiquetas acústicas y etiquetas satelitales, teniendo actualmente 312 animales marcados de nueve especies.

Los tiburones ballena fueron marcados con etiquetas satelitales tipo spot, mini-pat y mk10, obteniendo los mejores resultados con las marcas spot tipo torpedo, ya que esta especie tiene el hábito de acercarse a la superficie, lo que nos permitió obtener bastantes datos. Estos tiburones fueron marcados mediante buceo. Los tiburones martillo se marcaron con marcas satelitales y acústicas, pero en este caso mediante apnea, debido a que suelen espantarse con las burbujas y el ruido que producen los buses. En tanto los tiburones galápagos fueron marcados con etiquetas satelitales de luz y acústicas, mediante buceo. Y por último, los aletiblanco se etiquetaron solo con marcas acústicas por su tamaño, ya que no se acercan a la superficie.

Previo a la ampliación de 2017, se compiló la información obtenida hasta el momento por las etiquetas y receptores, para generar mapas de concentración de tiburones y tener una idea hacia dónde dirigir la ampliación (Figura 2). Tras procesar la información se encontró una tendencia importante sobre la dorsal de Malpelo y Yuruparí, las cuales son unas cadenas montañosas submarinas, que presentan varios picos conocidos como montes

submarinos. La ampliación de 2017 de Malpelo se desarrolló en base a la información colectada, junto con la aportada por otros estudios y se buscó cubrir un porcentaje significativo de la dorsal de Malpelo y de Yuruparí, logrando un área de 2.709.840 hectáreas.



**Figura 2.** Arriba se muestran los recorridos de los tiburones marcados por la Fundación Malpelo. Abajo se muestra el mapa de calor, con base a la concentración de tiburones a partir de la información de todas las etiquetas instaladas, lo cual fue un importante insumo para ampliación de Malpelo en 2017.

## Recomendaciones

El marcaje de animales se ha convertido en una de las herramientas fundamentales para estudiar la fauna marina, diseñar áreas marinas protegidas y generar medidas de manejo acorde a las necesidades de cada especie. Existen varias metodologías para etiquetar tiburones y de estas el buceo autónomo y apnea son las que menos estrés generan en el animal, pero es importante desarrollar esta actividad con alguien que ya tenga experiencia y minimizar el riesgo de ambas partes.

### Recursos

<https://www.fisheries.noaa.gov/new-england-mid-atlantic/atlantic-highly-migratory-species/tagging-instructions-and-resources-volunteers>

## Bibliografía

1. Chapple et al. 2015. *Racking sharks without teeth: a non-invasive rigid tag attachment for large predatory sharks*. *Animal Biotelemetry* 3:14.
2. Walton, I. & Cotton, C. 1898. *The complete angler, of the contemplative man's recreation*. Little, Brown, Boston.
3. McFarlane, G.A, Wydoski, R.S. & Prince, E.D. 1990. *Historical review of the development of external tags and marks*. *American Fisheries Society Symposium*, 7: 9-29.
4. Kohler, N.E. & Turner, P.A. 2001. *Shark tagging: a review of conventional methods and studies*. *Environmental Biology of Fishes*, 60: 191-223.
5. Monamy, V.; Gott, M. 2001. *Practical and ethical considerations for students conducting ecological research involving wildlife*. *Austral Ecology* 26: 293-300.
6. Bradford, R. W.; Hobday, A. J.; Evans, K.; Lansdell, M. 2009. *CMAR code of practice for tagging marine animals*. CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper 028. CSIRO, Hobart.
7. Wydoski, R.S. & Emery, L. 1983. *Tagging and marking*. In L. Neilsen & D. Johnson (eds). *Fisheries techniques*, pp. 215-237. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
8. NOAA. *Tagging Instructions and Resources for Volunteers*. 2022. [Citado 24/03/2022]. <https://www.fisheries.noaa.gov/new-england-mid-atlantic/atlantic-highly-migratory-species/tagging-instructions-and-resources-volunteers>
9. Fontes et al. 2018. *New non-invasive methods for short-term electronic tagging of pelagic sharks and rays*. *Marine Biology*, 165:34.



## Técnicas para el levantamiento de fotomosaicos para el monitoreo ecológico de arrecifes coralinos

---

Phanor H Montoya Maya\*

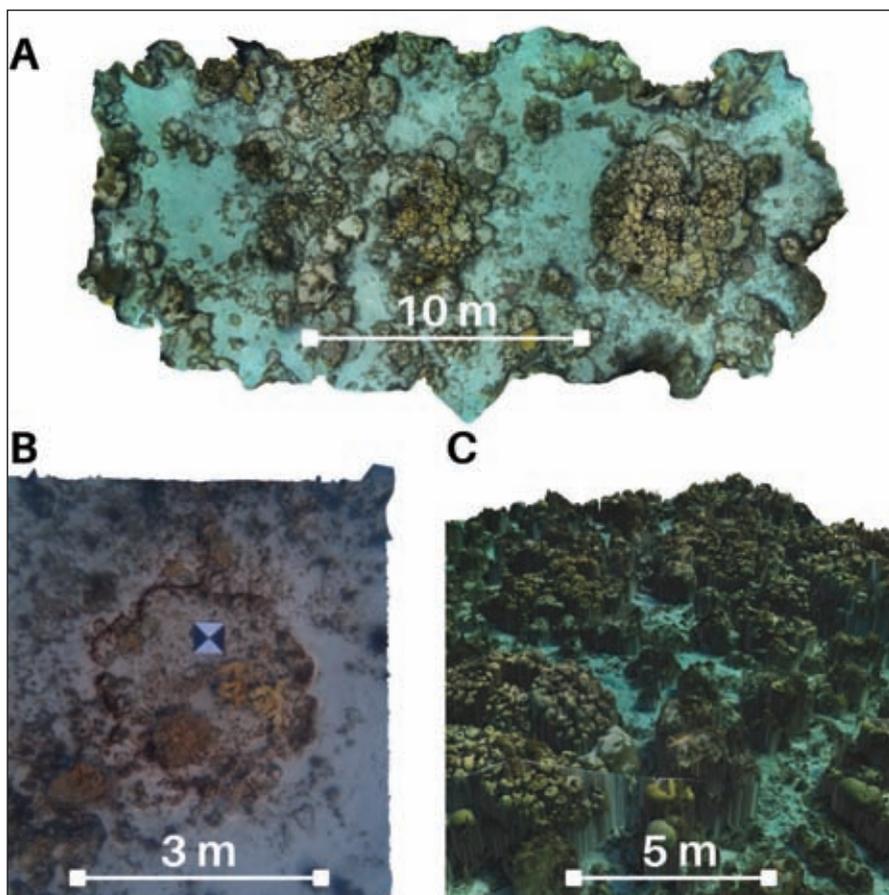
---

La resiliencia y los servicios ecosistémicos de los arrecifes de coral están relacionados estrechamente con la complejidad estructural y tridimensionalidad que generan el crecimiento de los corales escleractínios<sup>1,2</sup>. Sin embargo, en las últimas décadas el monitoreo ecológico del ecosistema ha identificado una disminución constante de la cobertura coralina a raíz del calentamiento del agua de mar, la proliferación de algas, encallamientos, pesca con dinamita, huracanes, entre otras causas que ocasionan la muerte de los corales constructores de arrecifes<sup>3,4</sup>. Por lo tanto, es pertinente realizar un continuo levantamiento de información sobre el estado y condición de los arrecifes de coral que, tomando ventaja de los avances tecnológicos, provea la mayor cantidad de información posible para guiar acciones de conservación y restauración a diferentes escalas de acción<sup>5,6</sup>.

Con el desarrollo de la fotografía digital y el aumento del poder computacional, la fotogrametría es una técnica que ha ganado un lugar importante en la lista de métodos para el monitoreo de arrecifes coralinos<sup>6-8</sup>. La fotogrametría permite el estudio y la definición de forma precisa de la forma, las dimensiones y/o la posición en el espacio de un objeto, a través de los datos obtenidos de una o varias fotografías. También permite obtener el modelo digital bi o tridimensional del terreno correspondiente al lugar representado<sup>9</sup>. A partir de la fotogrametría se pueden evaluar a largo plazo y conjuntamente la estructura, condición, rugosidad, crecimiento de los arrecifes coralinos y la efectividad de los procesos para su restauración<sup>10-13</sup>, entre muchas otras variables.

---

\* Corales de Paz, Cali, Colombia



**Figura 1.** Representaciones digitales de arrecifes coralinos obtenidos a partir de fotomosaicos generados a partir de fotos capturadas con cámaras GoPro Hero 4. A. Fotomosaico rectangular de 20m x 10m (200 m<sup>2</sup>) de arrecife en la isla de Providencia. B. Fotomosaico cuadrado de 5m x 5m (25 m<sup>2</sup>) de una parcela en restauración en el Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon. Se puede observar el cuadrado acrílico de 30cm x 30cm usado como punto de control del terrero y como escala. C. Fotomosaico tridimensional de 10 m x 10 m (100 m<sup>2</sup>) de una porción de arrecife en Mantas Place en Providencia.

Un fotomosaico es el insumo principal en el análisis fotogramétrico de arrecifes coralinos y de cualquier otro objeto de interés emergido o sumergido (e.g. una construcción, un bosque, una colonia de coral, o un naufragio). El fotomosaico no es nada más que la imagen creada a partir de la intersección de múltiples fotografías que están superpuestas (Fig. 1). Un fotomosaico entonces permite representar una escena georreferenciada a gran escala sin

pérdidas en la resolución o perspectiva<sup>9</sup>. El acceso a cámaras submarinas de alta resolución que hoy tienen los buzos ha permitido la rápida creación de fotomosaicos de gran detalle, sin una gran inversión financiera o capacitación intensiva, siempre que el buzo haya sido entrenado en las técnicas apropiadas para la adquisición de imágenes<sup>14</sup>.

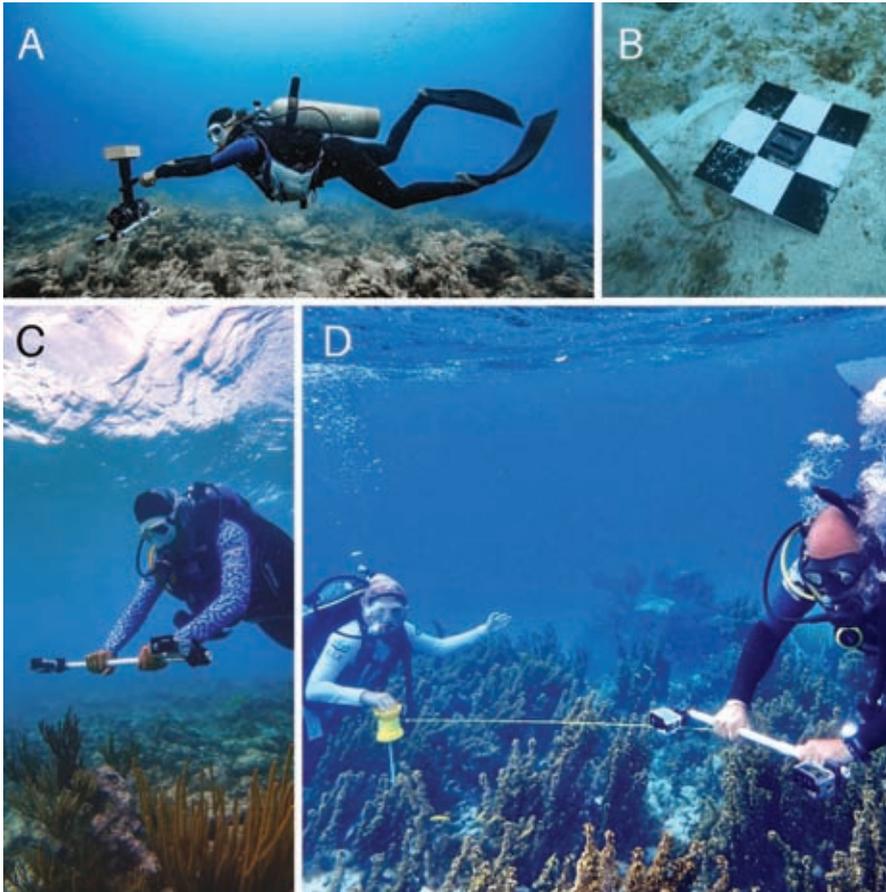
En este capítulo se describen equipos y materiales para la toma de imágenes, así como técnicas para el marcaje del área de interés. Se exponen los procedimientos en el agua para la captura de imágenes que servirán de insumo para la creación de los fotomosaicos. La técnica aquí descrita está aplicada al estudio de arrecifes coralinos. Sin embargo, es aplicable a cualquier objeto sumergido (e.g. naufragio, arrecife artificial). Cabe señalar que, si bien en este capítulo se describe la captura de las imágenes, el procesamiento de estas, la creación de los fotomosaicos está fuera del alcance de este documento.

La realización de esta actividad subacuática se rige por los procedimientos estándar de buceo recreativo y científico en aguas abiertas incluyendo un buen manejo de la flotabilidad, el uso de un computador de buceo, acceso a una fuente de oxígeno médico, primeros auxilios, acceso directo a la costa o un bote disponible de apoyo, uso de una o más boyas de marcación en superficie (e.g. boya cilíndrica “chorizo” inflable) y dispositivos electrónicos de señalización o llamado de emergencia en lugares remotos. Se requieren dos buzos con excelente manejo de su flotabilidad neutral y experiencia en patrones de búsqueda subacuática, que se dividan labores, manteniéndose en constante y cercana interacción.

## Equipos y materiales requeridos

- Mínimo dos (2) cámaras fotográficas del mismo modelo con sus respectivas cajas estancas. Aunque no hay una resolución mínima para las cámaras, mejores resultados se obtienen con más megapíxeles y/o grandes sensores. Las cámaras GoPro ofrecen una buena relación costo - calidad.
- Filtros rojos u otros de acuerdo con las condiciones del agua y profundidad.
- Marcas de referencia y escalas para demarcar, geoposicionar y escalar el área a fotografiar (Fig. 2A y 3C). Estas deben ser planas, de dimensiones conocidas, con peso (e.g. pesas de lastre amarradas) para evitar su movimiento, lo suficientemente grandes (30 cm o más de longitud) y con diferentes patrones en su superficie para que sean detectadas fácilmente por la cámara aun en condiciones de baja visibilidad.

- Accesorios de montaje de las cámaras.
- Baterías y tarjetas de memoria adicionales (32 GB o más).
- Estructura de soporte y manejo de cámaras (e.g. tubo de PVC, Fig. 2A-C).
- Navegador satelital o GPS (Posicionador Geográfico Satelital), preferiblemente de doble frecuencia.



**Figura 2.** Levantamiento de fotomosaicos para el monitoreo de arrecifes. A. Un buzo se encarga de la toma de fotos realizando un barrido sobre el arrecife manteniendo una distancia constante sobre el arrecife gracias a un buen control de su flotabilidad. B. Otro buzo se encarga de delimitar y referenciar el sitio ubicando escalas o puntos de control del terreno. A-C. El montaje para las cámaras puede ser avanzado como un sistema uMapTool™ de DeepCo con sensores fisicoquímicos y de posicionamiento (A) o sencillo como un simple tubo de PCV (C). D. Pareja de buzos realizando un barrido en circular o en espiral. Este patrón debe ser practicado previamente en tierra.

## Procedimientos pre-buceo

Antes de ingresar al agua se deben configurar las cámaras GoPro comprobando si hay baterías cargadas, tarjetas de memoria borradas y limpiar los lentes de las cámaras. Colocar las cámaras en sus cajas estancas y ajustar los filtros de buceo rojos si se van a usar. La función recomendada para la cámara es “Lapso de tiempo” donde se tome una foto a intervalos de 1 segundo o menos. Se recomienda que el modo predeterminado de la cámara se establezca en esta función para minimizar el riesgo de no poder alterar la configuración del modo una vez en el agua.

Las cajas estancas con las cámaras deben asegurarse a los soportes o accesorios de montaje a intervalos de aproximadamente medio metro (50 cm). Para áreas poco profundas donde el buzo nada cerca de la superficie, es recomendable montar las cámaras más cerca entre sí para garantizar que haya suficiente superposición entre las mismas, ya que la distancia al objetivo (arrecife) se reducirá. Las cámaras deben estar orientadas paralelamente hacia abajo.

## Marcaje y referenciación de área/objetivo

Antes de iniciar la toma de fotografías, compruebe y prepare las escalas y marcas de referencia o Puntos de Control del Terreno (PCTs, Fig. 2B). El área específica de arrecife u objeto a inspeccionar debe seleccionarse e identificarse antes de ingresar al agua cuando sea posible, de acuerdo con los objetivos de los fotomosaicos.

La ubicación de los PCTs dentro de un área a fotografiar es muy importante<sup>7</sup>. Los PCTs proporcionan una referencia constante y conocida para escalar el fotomosaico final. También indican la dirección a los buzos durante la navegación para la captura de fotos. Su ubicación final debe ser horizontal o sobre superficie plana donde no se puedan mover mientras se capturan las fotos o generen perspectivas deformadas en las cámaras, lo cual mejora sustancialmente el procesamiento del fotomosaico en el computador.

También hay que señalar que los PCTs deben ser ubicados distanciados unos de otros y abarcando toda el área a evaluar. Tradicionalmente, cada PCT puede demarcar un vértice o esquina del área o un punto cardinal. Una vez en su lugar final, es necesario dar referencia a su posición con ayuda de un GPS u otro sistema de posicionamiento geográfico y registrar su profundidad<sup>7</sup>. Esta tarea puede ser realizada por un buzo mientras el otro prepara las cámaras para la toma de fotografías.

## **Procedimientos para la captura de imágenes en el agua**

Una vez el primer buzo ha terminado de ubicar los PCTs, el segundo buzo entra al agua para realizar el barrido o navegación para la captura de imágenes. Los principales patrones de navegación para la captura de imágenes corresponden a dos de los patrones de búsqueda subacuática más utilizados: el barrido en S y en espiral o circular (Fig. 2A-D). Su elección está relacionada con la extensión y forma del área a evaluar. Por ejemplo, un barrido en S es más efectivo cuando el área de interés es rectangular o cuadrada (Fig. 1A-B) mientras que el barrido en espiral o circular solo aplica cuando el área tiene forma de cuadrado.

El barrido se realiza a 2 metros por encima del arrecife en todo momento, si las condiciones del agua lo permiten (visibilidad de >15 metros, poca o ninguna corriente u oleaje). Esto permitirá recorridos que capturan un ancho de 3 a 4 metros de paisaje arrecifal con el lente estándar de la mayoría de las cámaras disponibles en el mercado. Reduciendo así el número de pasadas necesarias. En áreas menos profundas o con menor visibilidad donde no se puede mantener esta distancia sobre el paisaje arrecifal, el ancho del área capturada por las imágenes en un paso disminuirá y, por lo tanto, la distancia entre pasadas también debe disminuir.

El buzo inicia las cámaras de manera simultánea, tomando nota de la profundidad y dirección a la que inicia el barrido. El barrido se inicia un metro por fuera del área de interés con el fin de asegurar que toda el área de interés es fotografiada. Este debe ser continuo, manteniendo la misma distancia al fondo en todo momento. El buzo debe mantener la estructura soporte de las cámaras al frente y lejos de su cuerpo como las condiciones lo permitan. Esto eliminará la sombra del buzo de las imágenes capturadas y dará como resultado imágenes más claras y un fotomosaico más preciso.

Cuando el objeto de interés tiene gran tridimensionalidad (e.g. una cabeza de coral cerebro gigante o un naufragio) el barrido horizontal desde arriba como se describió anteriormente puede complementarse con barridos adicionales desde otras perspectivas (e.g. rodeando el objeto) para garantizar que los lados o paredes del objeto sean generados correctamente durante el procesamiento del fotomosaico en el software respectivo (e.g. Agisoft Metashape™).

En caso de duda, el buzo debe hacer pasos adicionales. Aunque más imágenes significan un mayor tiempo de procesamiento, el resultado siempre será una imagen completa. Siempre se debe garantizar una superposición de al menos el 50% entre imágenes.

## Recomendaciones

Existen condiciones del agua o áreas con gran cobertura de macroalgas (*Turbinaria* spp o *Sargassum* spp) y/o corales blandos (e.g. Octocorales gorgonáceos) que dificultan la adquisición de imágenes para la creación de fotomosaicos. Cuando el agua está clara y quieta (sin acción de olas o corriente) y el sol es brillante por encima, aparecen ondas de luz a través del fondo marino. Estas ondas de luz, debido a su movimiento constante, dificultarán el procedimiento de alineación de las imágenes en el computador. Igual ocurre con el movimiento de las macroalgas o corales blandos por la acción del oleaje o la corriente.

La fotogrametría es ideal para el monitoreo del trasplante de corales con fines de restauración de arrecifes. Al crear archivos digitales que registran información a diferentes escalas de resolución que pueden ser replicadas en el tiempo, los fotomosaicos son una herramienta muy útil y versátil para la evaluación de huella ecológica de las acciones de restauración coralina en la recuperación de la cobertura coralina y la tridimensionalidad de los arrecifes coralinos<sup>13</sup>. Su fácil implementación por parte de buzos entrenados la hacen una importante herramienta de ciencia ciudadana para fortalecer la restauración de arrecifes coralinos<sup>13, 14</sup>.

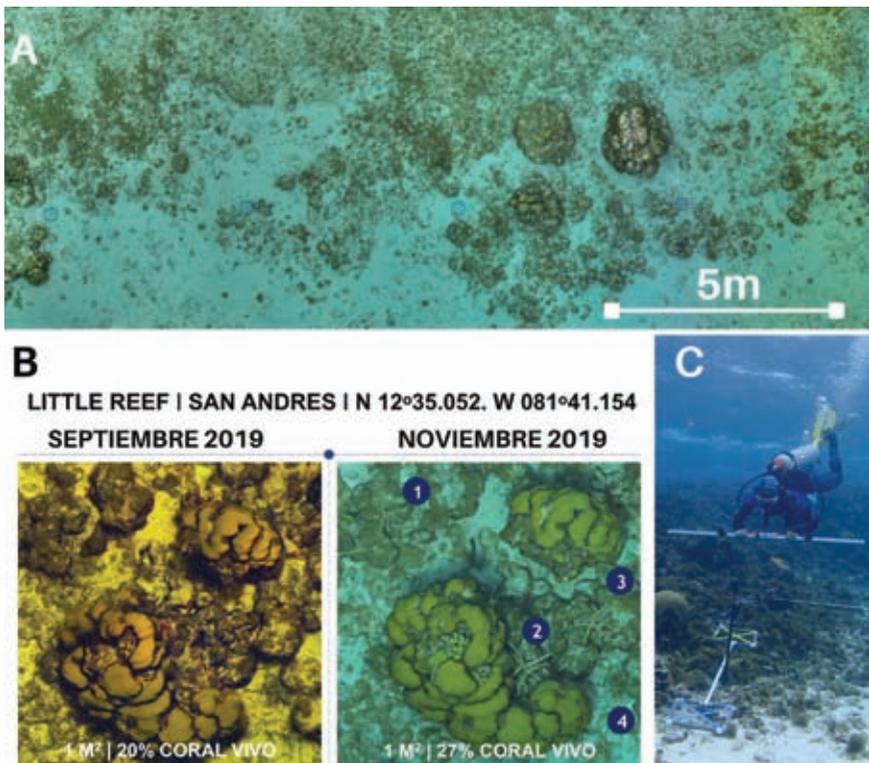
### Caso de estudio

*Evaluación de los efectos del trasplante de corales sobre la estructura de la comunidad Coralina en Little Reef, zona de máxima conservación en San Andrés Isla*

Con el objetivo de contrarrestar el deterioro coralino en el archipiélago y acelerar el proceso de recuperación natural, en octubre de 2017 se dio inicio al programa piloto “Restauración Coralina a gran escala en la Reserva de Biosfera Seaflower”. Para octubre de 2019, el proyecto terminó el trasplante de 2029 colonias de *Acropora cervicornis* en el arrecife de “Little Reef”, sector norte del Área Marina Protegida Seaflower en isla de San Andrés, Colombia<sup>15, 16</sup>.

El trasplante de las colonias cultivadas en viveros sumergidos consistió en la fijación de colonias en 15 parcelas de 5 x 5 m (25m<sup>2</sup>) en las que se trasplantaron colonias a una densidad promedio de 5 colonias/m<sup>2</sup>. El área efectiva de trasplante fue de 375m<sup>2</sup> y la zona intervenida (i.e. área de influencia de los trasplantes) se extendió 3375m<sup>2</sup> sobre el arrecife frontal de Little Reef. Evaluaciones antes de iniciar el trasplante revelaron la ausencia de colonias vivas de *A. cervicornis*, pero evidencia de la existencia previa de la especie en el arrecife<sup>17</sup>.

Para evaluar los efectos del trasplante sobre la dinámica de la comunidad bentónica de Little Reef y simultáneamente monitorear las colonias de coral trasplantadas se ubicaron cuatro transectos contiguos fijos georeferenciados de 20 m de largo sobre toda la zona intervenida, con un espacio entre transectos mayor a 50 m. En noviembre de 2019, inmediatamente finalizado el trasplante de las colonias se realizó la captura de imágenes para la creación de los fotomosaicos siguiendo un barrido en S a 1.5 metros de profundidad sobre cada transecto, cubriendo un área mínima de 20 m x 5 m a lo largo de cada transecto y tratando de mantener una superposición entre imágenes del 60%.



**Figura 3.** Fotomosaicos aplicados para evaluar el impacto del trasplante de corales en Little Reef, Isla de San Andrés, Colombia. A. Representación digital de un transecto permanente de 20 m x 5 m que incluye áreas intervenidas con el trasplante y sin intervenir (control). B. Ejemplo de la estimación de la cobertura de coral vivo antes y después del trasplante de corales. C. Un buzo realiza la captura de fotos siguiendo un patrón de barrido en S sobre el transecto. Se observa la estructura de PVC usada como punto de control del terreno.

La actividad de buceo consistió en un primer buzo encargado de la captura de imágenes empleando un montaje inicial de barra en PVC con nivelador de dos cámaras GoPro Hero 3 Black configuradas para tomar una imagen cada segundo. El segundo buzo estuvo encargado de la seguridad del primer buzo y de la ubicación de los puntos de control del terreno (PCT) durante los barridos. Los PCTs consistieron en dos marcos de PVC de 50 cm x 50 cm conectados por una barra de PVC de 230 cm, marcada en cada extremo con colores para referenciar el lado del transecto más cercano a la cosa (amarillo) y el más lejano (azul). Los PCTs fueron ubicados cada 5 m iniciando desde el metro 0 hasta el metro 20 de cada transecto (Fig. 3).

Se obtuvieron entre 1600 y 2000 fotos por transecto aproximadamente. Las fotos fueron procesadas para construir los fotomosaicos de cada transecto usando el software Agisoft MetaShape™ según la metodología propuesta por Raoult et al. (2016). Posteriormente la comunidad bentónica fue analizada para cada transecto con CPCe (Coral Point Count with Excel extensions,<sup>18</sup>), usando 100 puntos ubicados al azar sobre toda el área de la imagen. Posteriormente se realizó la identificación visual del sustrato bajo cada punto y se estimó la cobertura de cada categoría de sustrato en Tiempo 0 (sin trasplantes de *A. cervicornis*) y Tiempo 1 (después del trasplante).

Gracias a la técnica de fotomosaicos empleada se pudo obtener un archivo grafico bidimensional de alta resolución de 400 metros cuadrados del sustrato en Little Reef que servirá de línea base de la diversidad, cobertura, condición béntica, complejidad estructural con las cuales evaluar y monitorear el trasplante de colonias cultivadas en San Andrés.

Por su parte, el análisis de la comunidad bentónica a partir de los fotomosaicos en Little Reef permitió evidenciar el potencial que tiene el trasplante masivo de corales para incrementar la cobertura de coral vivo en los arrecifes. El trasplante de *A. cervicornis* en el arrecife resultó en incrementos de la cobertura de coral hasta en un 41.18% con respecto a la cobertura de coral vivo anterior<sup>15, 19</sup>.

El monitoreo con fotomosaicos en Little Reef se realiza anualmente. La última jornada de monitoreo fue realizada en marzo de 2021<sup>20</sup>. Gracias a que los transectos son fijos, el análisis preliminar de los fotomosaicos realizados permiten indicar que después de 18 meses del trasplante de las colonias estas presentan una supervivencia superior al 70%. El levantamiento de fotomosaicos y análisis de comunidades anual permitirá evaluar el proceso de restauración de Little Reef y generar insumos para nuevas acciones de restauración de otras áreas coralinas de San Andrés y Colombia.

## Bibliografía

1. Graham NAJ, Nash KL. *The importance of structural complexity in coral reef ecosystems*. Coral Reefs. 2013;32(2):315–26.
2. Miller S, Yadav S, Madin JS. *The contribution of corals to reef structural complexity in Kāneʻohe Bay*. Coral Reefs. 2021;40(6):1679–85.
3. Bates AE, Cooke RSC, Duncan MI, Edgar GJ, Bruno JF, Benedetti-Cecchi L, et al. *Climate resilience in marine protected areas and the ‘Protection Paradox’*. Biological Conservation. 2019;236:305–14.
4. Gardner TA, Côté IM, Gill JA, Grant A, Watkinson AR. *Long-Term Region-Wide Declines in Caribbean Corals*. Science. 2003;301(5635):958–60.
5. Vardi T, Hoot WC, Levy J, Shaver E, Winters RS, Banaszak AT, et al. *Six priorities to advance the science and practice of coral reef restoration worldwide*. Restoration Ecology. 2021;29(8).
6. Obura DO, Aeby G, Amorntthamarong N, Appeltans W, Bax N, Bishop J, et al. *Coral Reef Monitoring, Reef Assessment Technologies, and Ecosystem-Based Management*. Frontiers in Marine Science. 2019;6.
7. Rossi P, Castagnetti C, Capra A, Brooks AJ, Mancini F. *Detecting change in coral reef 3D structure using underwater photogrammetry: critical issues and performance metrics*. Applied Geomatics. 2019;12(S1):3–17.
8. Burns J, Delparte D, Gates RD, Takabayashi M. *Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs*. PeerJ. 2015;3:e1077.
9. Budi Cahyono A, Wibisono AC, Saptarini D, Permadi RI, Budisusanto Y, Hidayat H. *Underwater Photogrammetry Application for Coral Reef Mapping and Monitoring*. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. 2020;10(1).
10. Opel AH, Cavanaugh CM, Rotjan RD, Nelson JP. *The effect of coral restoration on Caribbean reef fish communities*. Marine Biology. 2017;164(12):221.
11. Lirman D, Schopmeyer S. *Ecological solutions to reef degradation: optimizing coral reef restoration in the Caribbean and Western Atlantic*. PeerJ. 2016;4:e2597.
12. Kolodziej G, Studivan MS, Gleason ACR, Langdon C, Enochs IC, Manzello DP. *Impacts of Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) on Coral Community Structure at an Inshore Patch Reef of the Upper Florida Keys Using Photomosaics*. Frontiers in Marine Science. 2021;8.
13. Goergen E, Schopmeyer S, Moulding A, Moura A, Kramer P, Viehman T. *Coral reef restoration monitoring guide: Methods to evaluate restoration success from local to ecosystem scales*. 2020.
14. Raoult V, David PA, Dupont SF, Mathewson CP, O’Neill SJ, Powell NN, et al. *GoPros as an underwater photogrammetry tool for citizen science*. PeerJ. 2016;4:e1960.

15. Bayraktarov E, Banaszak AT, Montoya Maya P, Kleypas J, Arias-Gonzalez JE, Blanco M, et al. *Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories*. PLoS One. 2020;15(8): e0228477.
16. Rodríguez A, Montoya P, Espinosa L, Licero Villanueva L. *La restauración de ecosistemas marinos y costeros. Un camino por explorar*. Boletín REDCRE. 2019;24-5.
17. Geister J. *Los arrecifes de la Isla de San Andrés (Mar Caribe, Colombia)*. The reefs of the island of San Andres (Caribbean Sea, Colombia)1973.
18. Kohler KE, Gill SM. *Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology*. Computers & Geosciences. 2006;32(9):1259-69.
19. Gnecco M, Maya M, Montoya-Maya P. *Producto 1: trasplante de colonias de Acropora cervicornis y A. palmata en áreas priorizadas, ensayo de microfragmentación y caracterización ecológica en San Andrés y Providencia – Reserva de Biosfera Seaflower*. Documento técnico. Noviembre 15 de 2019. Convenio de cooperación No. 6005573. 2019.
20. Alegría-Ortega A, Carmona C, Suárez S, Montoya-Maya PH. *Informe técnico preliminar de la evaluación de los efectos del trasplante de corales sobre la estructura de la comunidad coralina en Little Reef, zona de máxima conservación en San Andrés Isla*. Convenio No. NW-G-062 Riqueza Natural-Corales de Paz. 2021.



## Evaluación de interacciones entre corales masivos y otros organismos bentónicos

---

Catalina Gómez-Cubillos\*  
 Carlos Andrés Daza-Guerra\*\*  
 Juan Carlos Márquez\*\*\*  
 Sven Zea\*\*\*\*

---

En los arrecifes de coral, los organismos bentónicos sésiles compiten por recursos como luz, alimento, y especialmente espacio, para establecer, mantener y expandir el territorio<sup>26-3</sup> (Figura 1). Las interacciones de competencia pueden afectar la salud de los corales escleractíneos<sup>37</sup> y, el resultado de estas interacciones interespecíficas, es decir, quien gana o pierde y en qué proporción, determina en buena parte la estructura de las comunidades arrecifales<sup>14-20</sup>. Estas interacciones modulan el crecimiento, la reparación de lesiones y la capacidad reproductiva de los competidores, particularmente en corales hermatípicos<sup>4-11</sup>.

Las tendencias globales de aumento en la frecuencia e intensidad de peligros climáticos y no climáticos, inducidos principalmente por actividades humanas, han alterado la estructura, dinámica y estabilidad de los ecosistemas arrecifales, debido a que los corales y otros organismos estructurantes han reducido su resiliencia<sup>1-5</sup>. Esto ha dado paso a cambios de fase o la proliferación de comunidades no-constructoras y altamente competitivas como

---

\* Email: macgomezcu@unal.edu.co

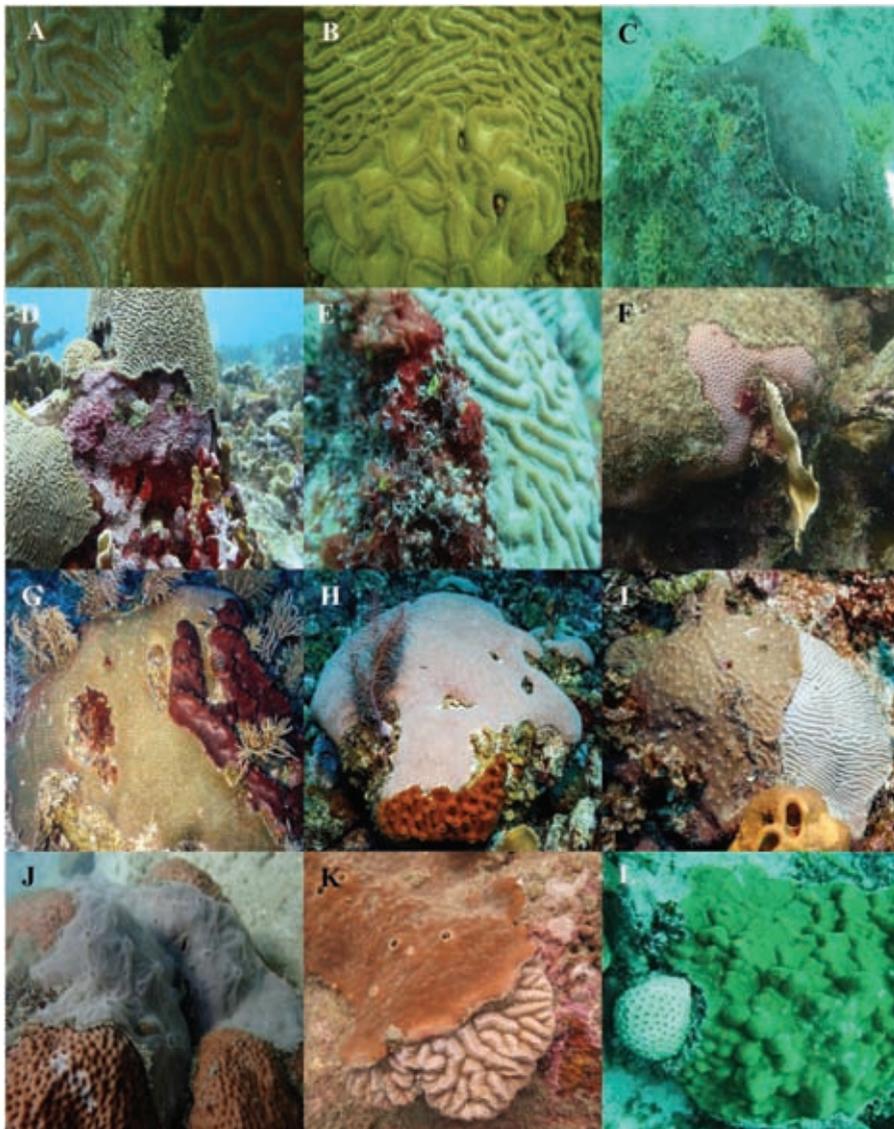
\*\* Email: caadazagu@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia – sede Caribe. Instituto de Estudios en Ciencias del Mar (CECIMAR). Grupo de investigación Fauna Marina Colombiana: Biodiversidad y Usos. Atte. Invemar, Playa Salguero, Rodadero, Santa Marta, Colombia.

\*\*\* Email: juan.marquez@invemar.org.co. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR.

\*\*\*\* Email: szeas@unal.edu.co Autor de correspondencia.

macroalgas, esponjas y octocorales<sup>23</sup>, provocando así un desbalance en los patrones naturales de competencia<sup>22</sup>.



**Figura 1.** Interacciones entre organismos bentónicos. A y B: coral-coral; C: coral-macroalgas frondosas; D: coral-algas costrosas; E: coral-céspedes; F: coral-milepórido; G-K: coral-esponjas y; L: coral-zoantídeo. PNN Tayrona (A,B,-C,F,J,K); Reserva de Biosfera Seaflower (D,E,G,H,I,L). Autor fotografía: Catalina Gómez (A,B,F,J,L); Carlos Daza (D,E); Juan Carlos Márquez (G,H,I) y Sven Zea (C,K).

A pesar de la relevancia ecológica de las interacciones entre organismos bentónicos arrecifales, estas dinámicas han sido poco estudiadas. Sólo hasta comienzos de los noventa se describieron algunos mecanismos de competencia entre especies de corales escleractínios, mediante el uso de estructuras (filamentos mesentéricos, tentáculos barredores) y/o secreciones para lesionar los tejidos de sus oponentes, generar fusión de tejidos o acelerar el crecimiento de áreas específicas (crecimiento en altura)<sup>26</sup>. En Colombia, las primeras investigaciones sobre interacciones entre corales-macroalgas frondosas<sup>31-28</sup> y entre corales-esponjas excavadoras<sup>12-27-30</sup> se realizaron a comienzos del siglo XXI. Casi una década después se describieron algunos de los factores bióticos y abióticos que modulan las interacciones entre corales masivos y céspedes algales en arrecifes continentales (Parque Nacional Natural Tayrona) y oceánicos (Reserva de Biosfera Seaflower) del Caribe colombiano<sup>16-17-18-19</sup>.

En el caso particular de las interacciones coral-céspedes, los resultados de las investigaciones han permitido demostrar que los céspedes generan muerte lenta del tejido coralino adyacente. La magnitud de la pérdida depende de la especie de coral involucrada, el tipo de organización colonial<sup>17</sup>, la estructura comunitaria de las algas, la cantidad y tipo de sedimentos que acumulan los céspedes en sus frondas<sup>18</sup>. En tal sentido, es de esperarse que la proliferación de céspedes a expensas de los constructores de arrecifes podría estar afectando la regeneración natural del tejido coralino y su propagación, procesos críticos para la recuperación de poblaciones perturbadas.

Actualmente, existe una necesidad imperante de encontrar soluciones científicas que permitan entender los cambios que se están dando en los ecosistemas marinos. Por lo tanto, se propone considerar la frecuencia y resultado de las interacciones entre corales con otros organismos bentónicos, particularmente con céspedes algales, como un indicador de degradación en arrecifes coralinos, dado que el incremento de las comunidades no estructurantes, al parecer es influenciado positivamente por el calentamiento y la acidificación de los océanos<sup>25-33-24</sup>.

El objetivo de este capítulo es describir las técnicas de evaluación y monitoreo de la frecuencia y el resultado de las interacciones entre corales masivos con otros organismos bentónicos, en arrecifes con profundidad somera a media (< 15 m), mediante las técnicas de transecto por fotocuadrante y el marcaje de colonias para la estimación de la tasa anual de avance/retroceso de tejido coralino en interacciones con céspedes o esponjas excavadoras. Adicionalmente, se presentan las técnicas para instalar trampas de sedimentos, recolectar

sedimentos en la interfaz coral-césped y extraer núcleos de esqueleto coralino cubierto por céspedes para análisis de la estructura comunitaria.

Entre los procedimientos de seguridad se incluye, realizar una reunión para planear las inmersiones, asignar responsabilidades y verificar la lista de materiales/equipos. Esta lista debe incluir repuestos de correas (caretas/aletas), empaques de caucho, baterías y un equipo de buceo adicional. Todos los recipientes para muestras deben estar rotulados.

Para evitar la pérdida de materiales/equipos, se recomienda: a) anudar cinta fluorescente a las herramientas (martillo/sacabocado/decámetro); juntar con zunchos y/o añadir arandelas metálicas a los materiales que flotan (bolsas/jeringas); c) lastrar cámaras y asegurarlas con mosquetón y gancho retráctil al chaleco y; d) guardar los materiales/equipos/muestras en nasas con colores llamativos.

La embarcación debe tener radio de comunicaciones, botiquín de primeros auxilios y salvavidas. Cada buzo debe contar con dispositivos de seguridad (computador/brújula/pito/estrobe/boya salchicha con carrete/cuchillo/guantes) y, en áreas oceánicas remotas, un dispositivo satelital de emergencia con código previamente reportado a las autoridades competentes. Antes de cada inmersión se debe geoposicionar el sitio y verificar su profundidad. Durante el descenso, si es posible, conviene identificar rápidamente los lugares para establecer los transectos y tomar las muestras para evitar grandes desplazamientos que ocasionen consumo innecesario de aire y/o perder la referencia al bote (ancla) y los compañeros. Particularmente en ambientes oceánicos o desconocidos, en todo momento se debe verificar la ubicación de los compañeros, mantener puntos de referencia y estar alerta ante cualquier peligro.

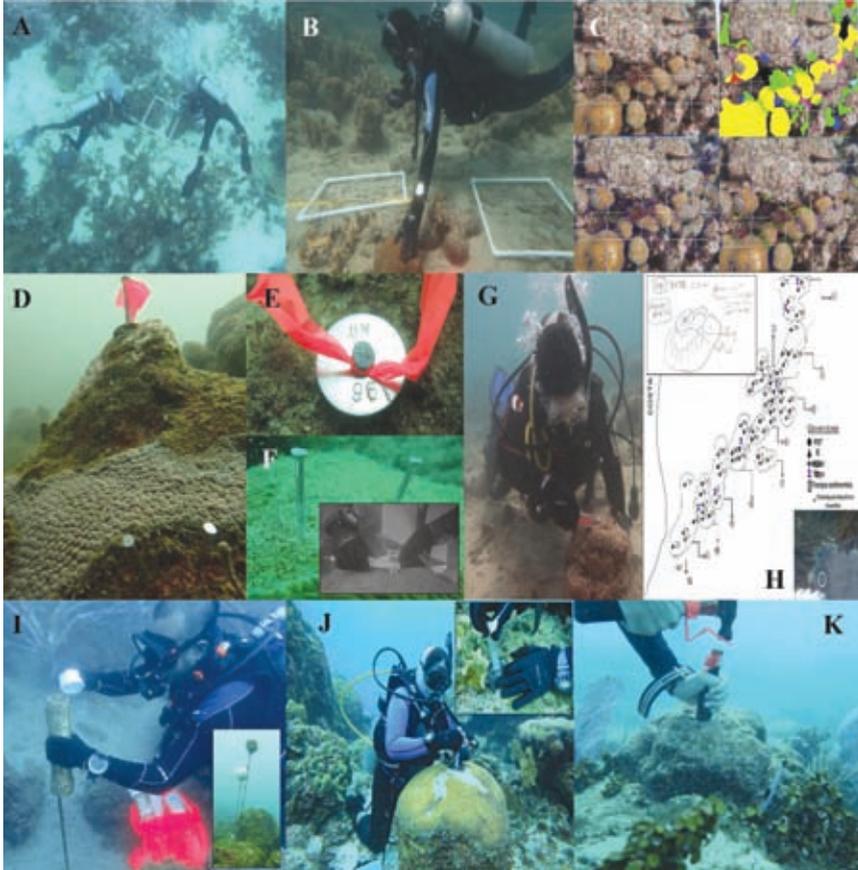
### **Frecuencia y resultado aparente de interacciones entre corales con otros organismos bentónicos**

Dependiendo de las facilidades logísticas y económicas de la investigación, por punto de muestreo (< 15 m de profundidad), guiados por un flexómetro tendido sobre el fondo, se evaluarán de 1 a 3 transectos de banda (10 x 2 m). Sobre cada transecto, cada metro y alternando de derecha a izquierda de la cinta, se ubicará un cuadrante de PVC de 1" (0,25 m<sup>2</sup>) subdividido en 25 cuadrículas, para evaluar en total 2,5 m<sup>2</sup> por transecto<sup>20</sup> (Figura 2A). Luego, empleando cámara digital con buena resolución y tratando de mantener la misma distancia focal, se tomarán fotografías de los cuadrantes completos y de porciones de ellos para lograr mayor detalle<sup>17</sup>, método conocido como fotocadrante<sup>35</sup> (Figura 2B).

Las fotografías obtenidas en campo se procesaran con software de uso libre como "ImageJ", para estimar por cuadrante la abundancia (%), área (cm<sup>2</sup>), perímetro (cm) y cobertura (%) por categorías bentónicas<sup>17-19</sup>: corales duros (escleractinios y milepóridos) (especie), algas (céspedes/ costrosas/ frondosas), esponjas (erectas/ incrustantes), corales blandos (gorgonáceos/ zoantídeos) y sustrato abiótico (arena/ escombros)<sup>7-15</sup>. Usando el mismo programa se podrá calcular por cuadrante la frecuencia (%), perímetro (cm) e índice de ocurrencia (%) de las interacciones identificadas entre corales con cada categoría bentónica de interés<sup>17-19</sup> (Figura 2C). Finalmente, se podrá evaluar el resultado aparente de las interacciones identificadas a partir de los siguientes criterios<sup>3-29-17</sup>: a) coral pierde: daños visibles del tejido coralino en la interfaz (cambios de coloración, discontinuidad tegumentaria, necrosis) ocasionados por sombreado, recubrimiento o contacto directo con el oponente; b) coral gana: los pólipos en el borde forman elevaciones a manera de labios que evaden la interacción y, c) aparentemente neutra: el tejido coralino y el competidor se encuentran en un mismo nivel (ángulo 180°) y no se observa deterioro de los pólipos en la interacción. Se aconseja utilizar la especie coralina y/o el tipo de organización colonial, la cual depende de la forma del coralito y de la estructura del coralum<sup>34-36</sup>, como factores para analizar la frecuencia y el resultado aparente de las interacciones (Figura 3A-C).

## Marcaje de colonias y montajes experimentales

Para calcular la tasa anual de avance/retroceso de tejido coralino en interacción, por estación se deben marcar entre 15 y 20 colonias por especie coralina, que tengan parte de su esqueleto recubierto por céspedes o esponjas excavadoras y donde sea evidente la presencia de interacciones activas (coral pierde o neutra)<sup>30-16</sup> (Figura 2D). El marcaje de las colonias se realizará sobre una porción muerta donde se clavará una puntilla tipo vareta de acero galvanizado de 5". A esta puntilla se le adosará una arandela en acero inoxidable (2" Ø externo, 3/8" orificio central), grabada con un código de identificación y con una cinta fluorescente amarrada al cabezote de la puntilla (Figura 2E). En la porción relevante de la interacción, sobre el césped/esponja, a 2 cm aproximadamente del borde de interacción se clavarán dos puntillas de 2" en acero inoxidable, separadas entre sí 5 cm<sup>38</sup>, que servirán de referencia para medir con calibrador Vernier de plástico, el avance/retroceso de tejido coralino en interacción. La tasa anual de avance/retroceso por especie coralina y estación se calculará a partir de mediciones semestrales o anuales de la distancia entre cada puntilla con el borde de interacción<sup>30-16</sup> (Figura 2F).



**Figura 2.** Técnicas de evaluación y monitoreo de interacciones entre corales masivos y otros organismos bentónicos. A: Transecto de banda; B: fotocuadrante; C: procesamiento fotografías (ImageJ); D: marcaje colonias experimentales; E: arandela de identificación; F: puntillas de referencia (detalle: medición con calibrador); G: mantenimiento de marcas; H: mapa de referencia (detalle: dibujo colonia experimental); I: trampas de sedimentos (detalle: boyas de marcación); J: succión de sedimentos en la interfaz y; K: extracción de núcleos. PNN Tayrona (B,C,D,E,F,G,H,I); Reserva de Biosfera Seaflower (A,J,K). Autor fotografía: Catalina Gómez (B,C,F,I,K); Carlos Daza (G); Juan Carlos Márquez (D); Sven Zea (E,H); Alejandro Lozano (A,J).

Durante cada campaña se deberán realizar las siguientes actividades: a) mantenimiento de las marcas de identificación (limpieza de arandelas y reemplazo de cintas plásticas) (Figura 2G); b) registro fotográfico por colonia y de las interacciones de interés para construir fichas de seguimiento y c) anotaciones relevantes sobre enfermedades coralinas, invasión de macroalgas, presencia de

territorios de peces Damisela del género *Stegastes*, para excluir del análisis datos influenciados por el efecto colateral de factores externos a la interacción<sup>16</sup>.

Se sugiere ubicar algunas boyas de marcación amarradas a 1-2 m sobre el fondo (a una puntilla de acero clavada en los lados muertos de algún coral o al fondo duro) y elaborar mapas con la ubicación de las colonias experimentales para facilitar su reencuentro durante los monitoreos. Además, se aconseja realizar por colonia dibujos a mano alzada para verificar la ubicación de las puntillas y la dirección de las mediciones (Figura 2H).

### **Técnicas complementarias: tasas de sedimentación, recolecta de sedimentos acumulados en la interfaz y extracción de núcleos de esqueleto coralino**

Para evaluar los flujos de sedimentos descendentes sobre los arrecifes y caracterizar la influencia de la escorrentía continental<sup>40-32-13</sup>, por estación se instalará un juego de 3 trampas de sedimentos que deberán ser recogidas y reemplazadas trimestralmente. Para ello, se enterrarán en el sedimento, en valles entre colonias coralinas, varillas de hierro de 1/2" Ø y 2 m de altura, usando un martillo pesado. A la varilla se le adosará una trampa cilíndrica de tubo PVC (2" Ø y 30 cm de largo, con una tapa pegada en la parte inferior) sostenida con amarres plásticos, a una altura sobre el fondo entre 30-50 cm, según la altura general de las colonias del lugar. Al recoger las trampas se sellarán *in situ* con tapa de PVC de 2" Ø (Figura 2I). Los sedimentos capturados se analizarán en laboratorio mediante técnicas de tamizaje, peso seco total/fracción y calcimetría<sup>40-16</sup>.

En las interacciones de interés, se recolectará trimestral o semestralmente los sedimentos acumulados en la interfaz. Para ello, sobre cada interacción se ubicará un marco de caucho (neumático de llanta) rectangular de 4.5 cm<sup>2</sup> (3 cm de largo x 1.5 cm de ancho, simulando un campo quirúrgico) y luego, con una jeringa de 20 cm<sup>3</sup> se succionarán cuidadosamente los sedimentos acumulados en el área delimitada por el dispositivo<sup>18</sup> (Figura 2J). Para evitar dispersión y pérdida de sedimentos se aconseja realizar este procedimiento antes de hacer otras mediciones o el mantenimiento de las placas de identificación. Las muestras deberán almacenarse en frío con alcohol al 96 %. Los sedimentos recolectados se analizarán en laboratorio mediante técnicas de tamizaje, peso seco total/fracción y calcinación en mufla<sup>18</sup>.

La técnica para caracterizar la estructura comunitaria de las algales que compiten con corales masivos es la extracción de núcleos de esqueleto coralino

sobre la interacción de interés. Para ello, por colonia se debe extraer 1-2 núcleos empleando un martillo y un sacabocado de impacto de 27 mm Ø (5.7 cm<sup>2</sup>)<sup>29</sup>. Durante la operación, los golpes verticales deben ser fuertes. Para verificar que el núcleo se haya desprendido completamente, se deben dar golpes laterales suaves al sacabocado (Figura 2K). No se deben extraer muestras de colonias pequeñas para evitar quebrarlas por el efecto del “golpe de ariete”. Además, para reducir el riesgo de daño colonial o de las herramientas se debe evitar la extracción sobre superficies verticales o con pliegues/protuberancias. Una vez se obtengan los núcleos se deben almacenar en bolsas Whirl-Pak y transportarlos al laboratorio en baldes con agua de mar fresca. En laboratorio, cada muestra se guarda en frío en un tarro plástico con alcohol al 96 %. Estos núcleos se emplearán para determinar composición, abundancia por taxa, altura, cobertura, densidad y biomasa<sup>18</sup> (Figura 3D). Se aconseja tomar registro fotográfico de la colonia y la interfaz antes de la extracción.

### **Caso de estudio**

#### *Céspedes algales con sedimentos y sus efectos sobre los arrecifes de coral en el Caribe colombiano*

En la actualidad los céspedes algales son el componente bentónico más abundante en la mayoría de arrecifes<sup>39-22</sup> y el principal competidor de corales hermatípicos en algunos arrecifes continentales<sup>17</sup> y oceánicos<sup>19</sup> del Caribe colombiano.

Estos ensamblajes están compuestos por una gran variedad de grupos que incluyen cianobacterias y algas rojas, verdes y pardas, con altura de dosel no mayor a 2 cm. Su morfología depende del hábitat donde se desarrollan, siendo las formas filamentosas, las pequeñas foliáceas y las calcáreas articuladas las más frecuentes<sup>10-9-18</sup> (Figura 3E).

En los arrecifes, los céspedes son la principal fuente de productividad primaria<sup>8</sup>, facilitan el reciclaje de nutrientes<sup>20</sup> y sirven de hábitat y alimento para numerosas especies de invertebrados y peces<sup>21</sup>. No obstante, investigaciones recientes sugieren que los céspedes tienen un impacto negativo sobre las comunidades arrecifales, ya que como sustrato poblado limitan el establecimiento exitoso de larvas de coral y otros organismos<sup>2-6</sup>. En interacciones con corales generalmente ocasionan la muerte lenta del tejido coralino adyacente<sup>38-16</sup>.

A partir de las evaluaciones con el método del fotocuartante en arrecifes del PNN Tayrona y la Reserva de Biosfera Seaflower, se ha podido establecer

que en interacciones coral-césped, la frecuencia depende de la susceptibilidad particular de cada especie de coral a perder tejido, en respuesta al conjunto de perturbaciones que afectan su hábitat. El resultado aparente depende del tipo de organización colonial, siendo las formas meandroides y cerioides los competidores más exitosos, debido al mecanismo de evasión por crecimiento en altura. Esto, opuesto a lo observado para las formas plocoides que son más propensas a perder<sup>17-19</sup>. Estos resultados sugieren que la proliferación de céspedes a expensas de los constructores de arrecife podría promover cambios de fase<sup>3</sup>, ya que el aumento en la frecuencia e intensidad de las perturbaciones limitaría los tiempos de recuperación y la capacidad de defensa de los corales, provocando a futuro cambios en la estructura y dinámicas de las comunidades arrecifales.

Para el área de Santa Marta y el PNN Tayrona el seguimiento (series de tiempo 1988-1990; 2004-2006 y 2016-2018) de 195 colonias experimentales de 4 especies de corales masivos morfológicamente contrastantes (*Pseudodiploria strigosa*, *Montastraea cavernosa*, *Stephanocoenia intersepta* y *Siderastrea siderea*), reveló que, en general y con dependencia de la estación y la serie analizada, en interacciones coral-césped hay pérdida de tejido coralino, pero cada especie de coral registra una respuesta específica. Por ejemplo, *M. cavernosa* a pesar de ser la especie con las mayores tasas promedio de pérdida (entre  $-3.1$  y  $-20.7$  mm año<sup>-1</sup>), registró fuertes pulsos interanuales de pérdida y recuperación de tejido asociados con la disponibilidad de sedimentos por escorrentía. Por el contrario, *P. strigosa* fue la especie con las tasas de pérdida promedio más bajas (entre  $-0.1$  y  $-3.2$  mm año<sup>-1</sup>), llegando a registrar en la mayoría de los casos ganancia de tejido (entre  $+0.9$  y  $+1.2$  mm año<sup>-1</sup>) debido al mecanismo de evasión por crecimiento en altura, el cual permite contrarrestar el avance lateral y efecto deletéreo de los céspedes. Para las demás especies evaluadas, se registraron tasas promedio de pérdida de tejido coralino intermedias (*S. intersepta*: entre  $-5.0$  y  $-8.2$  mm año<sup>-1</sup> y *S. siderea*: entre  $-3.8$  y  $-4.6$  mm año<sup>-1</sup>)<sup>16</sup> (Figura 3).

A partir de estas investigaciones, también se demostró que la composición y desarrollo estructural de los céspedes algales en interacción con corales masivos, así como su capacidad para retener sedimentos (hasta 21 veces su peso en biomasa), son ventajas competitivas que los céspedes aprovechan para matar y desplazar el tejido coralino adyacente. No obstante, la presencia de territorios de peces Damiselas del género *Stegastes* ayuda, en parte, a controlar la complejidad estructural de estos ensamblajes algales. Adicionalmente, se confirmó que los céspedes morfológicamente más complejos retienen mayor cantidad de sedimentos, particularmente fracciones finas (limos/arcillas), material que le sirve de soporte a los céspedes para avanzar lateralmente y ahogar al tejido coralino vecino<sup>18</sup>. Esta ventaja

competitiva de retener sedimentos disuade la acción de los herbívoros y reduce la capacidad de las diferentes formas de crecimiento de los corales para evadir o confrontar directamente a los céspedes<sup>41</sup>.

Todo lo anterior, podría incrementar las tasas de pérdida de tejido coralino y fomentar a su vez la pérdida de estructura y funciones de las comunidades coralinas, particularmente en arrecifes costeros expuestos a altos niveles de sedimentación. Promoviendo así que los arrecifes dominados por corales pasen a estar dominados por macroalgas, particularmente por céspedes algales.



**Figura 3.** Resultado de interacciones coral-césped: coral gana (A), coral pierde (B) y aparentemente neutra (C); D: núcleo de interfase coral vivo - céspedes y; E: micrografías de taxa del césped en interacción con tejido coralino). PNN Tayrona (todas las fotos). Autor fotografía: Catalina Gómez (D,E); Juan Carlos Márquez (C); Sven Zea (A,B).

## Recomendaciones

Los métodos de fotocadrante, marcaje de colonias experimentales y demás técnicas complementarias descritas para evaluar la frecuencia y resultado de interacciones entre corales con otros organismos bentónicos en arrecifes del Caribe colombiano, son metodologías de buceo científico sencillas, seguras y replicables. Estas investigaciones son relevantes porque permiten ampliar nuestro conocimiento sobre los efectos de las perturbaciones sobre el balance de las comunidades arrecifales, incluso en áreas oceánicas remotas

(Reserva de Biosfera Seaflower). Además, reconociendo que los céspedes son comunidades altamente resistentes a las perturbaciones y que su fisiología es influenciada positivamente por el calentamiento y la acidificación de los océanos, su estudio contribuye al entendimiento de las trayectorias de cambio que experimentan los arrecifes de coral.

## Bibliografía

1. Aerts, L.A.M. 1999. Sponge-coral interactions on Caribbean reefs. PhD Thesis Biology Faculty- Universiteit van Amsterdam. Digital Academic Repository. Amsterdam. 165 p. Available from: [https://pure.uva.nl/ws/files/3122802/8334\\_UBA003000089.pdf](https://pure.uva.nl/ws/files/3122802/8334_UBA003000089.pdf)
2. Airoidi, L. 2003. The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. In Gibson R.N and Atkinsin R.J.A (eds) *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 41: 161-236.
3. Barott, K.L., Williams, G.J., Vermeij, M.J., Harris, J., Smith, J.E., Rohwer, F.L., and Sandin, S.A. 2012. Natural history of coral- algae competition across a gradient of human activity in the Line Islands. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 460, 1-12. doi: 10.3354/meps09874.
4. Benayahu, Y. and Loya, Y. 1981. Competition for space among coral-reef sessile organisms at Eilat, Red Sea. *Bull. Mar. Sci.*, 31(3), 514-522.
5. Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L., Kairo, J.G., Aristegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M.S., Levin, L., O'Donoghue, S., Purca-Cuicapusa, S.R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A. and Williamson, P. 2019. Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. 142 p. Available from: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/09\\_SROCC\\_Ch05\\_FINAL-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/09_SROCC_Ch05_FINAL-1.pdf)
6. Birrell, Ch.L., McCook, L.J. and Willis, B.L. 2005. Effects of algal turfs and sediment on coral settlement. *Mar. Pollut. Bull.*, 51: 408-414. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.10.022
7. Caribbean Coastal Marine Productivity - CARICOMP. 2001. Methods manual levels 1 and 2: Manual of Methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean. Centre for Marine Sciences, University of the West Indies, Mona, Kingston, Jamaica and Florida Institute of Oceanography, University of South Florida. 93 p. Available from: [https://biogeodb.stri.si.edu/physical\\_monitoring/downloads/caricomp\\_manual\\_2001.pdf](https://biogeodb.stri.si.edu/physical_monitoring/downloads/caricomp_manual_2001.pdf)
8. Carpenter, R. and Williams, S. 2007. Mass transfer limitation of photosynthesis of coral reef algal turfs. *Mar. Biol.*, 151: 435-450. doi:10.1007/s00227-006-0465-3.

9. Cetz-Navarro, N.P., Quan-Young, L.I. and Espinoza-Avalos, J. 2015. Morphological and community changes of turf algae in competition with corals. *Scientific Reports*, 5: 1-12. doi: 10.1038/srep12814.
10. Connell, S.D., Foster, M.S. and Airoldi, L. 2014. What are algal turfs? Towards a better description of turfs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 495: 299-307. doi: 10.3354/meps10513.
11. Chadwick, N.E. and Morrow, K.M. 2011. Competition among sessile organisms on coral reefs. In *Dubinsky, Z. and Stambler N.(eds.) Coral reefs: an ecosystem in transition*, 347-371. Springer. doi: 10.1007/978-94-007-0114-4\_20.
12. Chaves-Fonnegra, A., López-Victoria, M., Parra-Velandia, F., and Zea, S. 2005. Ecología química de las esponjas excavadoras *Cliona aprica*, *C. caribbaea*, *C. delitrix* y *C. tenuis*. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 34: 43-67. doi:https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2005.34.0.233.
13. Flórez-Leiva, L., Rangel-Campo, A., Díaz-Ruiz, M., Venera-Pontón, D. and Díaz-Pulido, G. 2010. Efecto de la sedimentación en el reclutamiento de las macroalgas *Dictyota* spp. y *Lobophora variegata*: un estudio experimental en el Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 39(1), 41-56. doi:https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.1.141.
14. Fricke, A., Teichberg, M., Beilfuss, S. and Bischof, K. 2011. Succession patterns in algal turf vegetation on a Caribbean coral reef. *Botánica Marina*, 54(2): 111-126. Doi:10.1515/BOT.2011.021.
15. Garzón-Ferreira, J. and Rodríguez-Ramírez, A. (2010). Development and implementation of a coral reef monitoring network in Colombia. *Rev. Biol. Trop*, 58 (suppl.1): 67-80.
16. Gómez-Cubillos, C. 2018. Interacciones coral-césped de algas y sus efectos en la comunidad coralina en el área de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis MSc., Ciencias-Biología, Línea Biología Marina - Universidad Nacional de Colombia, CECIMAR - Sede Caribe. Repositorio Institucional. Santa Marta. 123 p. Disponible en: file:///C:/Users/user/Downloads/52538377.2018.pdf
17. Gómez-Cubillos, C., Gómez-Cubillos, M.C., Sanjuan-Muñoz, A. and Zea, S. 2019. Interacciones de corales masivos con céspedes algales y otros organismos en arrecifes del Parque Nacional Natural Tayrona. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 48(2): 143-171. doi:https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.770
18. Gómez-Cubillos, C., Gavio, B. and Zea, S. 2020. Estructura de la comunidad de céspedes algales en interacciones con corales masivos en arrecifes del Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 49 (SuplEsp), 45-72. doi:https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.SuplEsp.1053
19. Gómez-Cubillos, C., Daza-Guerra, C.A., Gavio, B. y Zea, S. En prensa. Interacción coral-céspedes algales y su efecto sobre la comunidad arrecifal de isla Cayos de Alburquerque, Reserva de la Biosfera Seaflower. En Comisión Colombiana

- del Océano - CCO (eds). Resultados de la expedición científica Seaflower 2018, islas Cayo de Alburquerque.
20. Gowan, J.C., Tootell, J.S. and Carpenter, R.C. 2014. The effects of water flow and sedimentation on interactions between massive *Porites* and algal turf. *Coral Reefs*, 33: 651-663. doi:10.1007/s00338-014-1154-1
  21. Harris, J.L. 2015. The ecology of turf algae on coral reefs. PhD Thesis Marine Biology - University of California. San Diego. 201 p. Available from: file:///C:/Users/user/Downloads/eScholarship%20UC%20item%207gb5h3zm.pdf
  22. Harris, J.L., Lewis, L.S. and Smith, J.E. 2015. Quantifying scales of spatial variability in algal turf assemblages on coral reefs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 532: 41-57. doi:10.3354/meps11344
  23. Jackson J.B.C., Donovan, M.K., Kramer K.I. and Lam, V.V. (eds). 2014. Status and trends of Caribbean coral reefs: 1970 - 2012. In *Global Coral Reef Monitoring Network*, IUCN, Gland, Switzerland. 306 p.
  24. Johnson, M.D., Comeau, S., Lantz, C.A. y Smith, J.E. 2017. Complex and interactive effects of ocean acidification and temperature on epilithic and endolithic coral-reef turf algal assemblages. *Coral reefs* 36: 1-12. Doi:10.1007/s00338-017-1597-2
  25. Kroeker, K., Micheli, F y Gambi, C. 2012. Ocean acidification causes ecosystem shifts via altered competitive interactions. *Nature Climate Change*, 3; 156-159. doi:10.1038/NCLIMATE1680
  26. Lang, J.C., and Chornesky, E.A. 1990. Competition between scleractinian reef corals: a review of mechanisms and effects. In Z. Dubinsky (eds) *Ecosystems of the world: Coral reefs* (209-252). Elsevier.
  27. López-Victoria, M., Zea, S., and Weil, E. 2006. Competition for space between encrusting excavating Caribbean sponges and other coral reef organisms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 312:113-121. Available from: <https://www.int-res.com/articles/meps2006/312/m312p113.pdf>
  28. Márquez, J.C. and Díaz, J.M. (2005). Interacciones entre corales y macroalgas: dependencia de las especies involucradas. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 34: 227-242. doi:<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2005.34.0.242>
  29. Márquez, J.C. and Zea, S. 2012. Parrotfish mediation in coral mortality and bioerosion by the encrusting, excavating sponge *Cliona tenuis*. *Marine Ecology*, 33(4), 417-426. doi:10.1111/j.1439-0485.2011.00506.x
  30. Márquez, J.C., Zea, S. and López-Victoria, M. 2006. Is competition for space between the encrusting excavating sponge *Cliona tenuis* and corals influenced by higher-than-normal temperatures?. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 35(1): 259-265. doi:<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2006.35.0.230>
  31. Mejía-Niño, N. and Garzón-Ferreira, J. 2003. Dinámica de las interacciones alga-coral en dos bahías de la región de Santa Marta (Caribe colombiano) con dis-

- tinto grado de influencia antropogénica. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 32(1): 243-261. doi:<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2003.32.0.269>
32. Nugues, M.M. and Roberts, C.M. 2003. Coral mortality and interaction with algae in relation to sedimentation. *Coral reefs*, 22(4): 507-516. doi:10.1007/s00338-003-0338-x
  33. Ober, G.T., Díaz-Pulido, G. and Thornber, C. 2016. Ocean acidification influences the biomass and diversity of reef-associated turf algal communities. *Marine Biology*: 163-204. Doi:10.1007/s00227-016-2978-8
  34. Ogilvie, M. 1896. Microscopic and systematic study of Madreporarian types of corals. *Phil. Trans. R Soc. Lond.*, 187, 83-345. Available from: 1896<https://doi.org/10.1098/rstb.1896.0003>.
  35. Preskitt, L.B., Vroom, P.S., and Smith, C.M. 2004. A rapid ecological assessment (REA) quantitative survey method for benthic algae using photoquadrats with SCUBA. *Pacific Science*, 58(2): 201-209. Available from:<https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/2721/vol58n2-201-209.pdf>
  36. Reyes, J., Santodomingo, N., and Flórez, P. 2010. Corales escleractíneos de Colombia. Invemar (eds), Serie de Publicaciones Especiales, No. 14. Santa Marta, 246 p.
  37. Rotjan, R.D. and Lewis, S.M. 2008. Impact of coral predators on tropical reefs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 367: 73-91. doi: 10.3354/meps07531
  38. Roy, R.E. 2004. Akumal s reefs: Stony coral communities along the developing Mexican Caribbean coastline. *Rev. Biol. Trop.*, 52(4), 869-881. Available from: [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442004000400006](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442004000400006)
  39. Sandin, S.A., Smith, J.E., DeMartini, E.E., Dinsdale, E.A., Donner, S.D., Friedlander, A.M., Konotchick, T., Malay, M., Maragos, J.E., Obura, D., Pantos, O., Paulay, G., Richie, M., Rohwer, F., Schroeder, R.E., Walsh, S., Jackson, J.B.C., Knowlton, N., and Sala, E. 2008. Baselines and degradation of coral reefs in the Northern Line Islands. *PloS one*, 3(2), e1548. doi:10.1371/journal.pone.0001548.
  40. Zea, S. 1994. Patterns of coral and sponge abundance in stressed coral reefs at Santa Marta, Colombian Caribbean. In R. Van Soest, T. Van Kempen, and Brackman, J. C. (Eds.), *Sponge in time and space* (pp. 257-264). Balkema, Offprint.
  41. Zhiheng, L., Kefu, Y., Yinghui, W., Xueyong, H. and Xu L. 2019. Coral-algal interactions at Weizhou Island in the northern South China sea: variations by taxa and the exacerbating impact of sediments trapped in turf algae. *PeerJ*, 7: e6590. doi.org/10.7717/peerj.6590.

## Técnicas para el marcaje y monitoreo de octocorales, “bosques de animales”, en el Caribe y Pacífico colombianos

---

Juan A. Sánchez\*

Luisa F. Dueñas\*\*

---

En ambas costas de América tropical y subtropical, muchos arrecifes rocosos y coralinos se caracterizan por ser el ambiente para densas comunidades de octocorales<sup>1</sup>. La mayoría de estos octocorales (Cnidaria: Octocorallia, ‘Holaxonia’), contienen un esqueleto axial de gorgonina y pertenecen a las familias Gorgoniidae, Plexauridae y Ellisellidae, que se caracterizan por formar estructuras arborescentes y tridimensionales. En contraste con sus contrapartes del Indo Pacífico, que son corales blandos (y carnosos), estos organismos tienen poca área de unión con el sustrato y la mayor parte de su biomasa está por encima de la base. Estos corales pueden alcanzar más de 2 m de altura e incluso cerrar un “dosel” en las comunidades más densas del mar Caribe, generando un ambiente único que se le conoce como los ‘bosques de animales’<sup>2</sup>.

A pesar de la disminución constante de los corales escleractínios<sup>3</sup>, los principales organismos formadores de arrecifes en la actualidad<sup>4</sup>, los octocorales se han mantenido saludables pese a las condiciones de deterioro predominantes como son el calentamiento del agua de mar<sup>5</sup> y la acidificación oceánica<sup>6</sup>. Los octocorales como corales suaves no se consideran constructores de arrecifes eficientes, sin embargo en colonias grandes, sus bases en forma de disco succionador están fuertemente calcificadas<sup>7</sup>. El área de estas estructuras calcificadas en una colonia alta puede ser del tamaño de un coral pequeño a mediano de hasta 30 cm de diámetro y existen registros de estas estructuras

---

\* Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

\*\* Departamento de Biología, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá.

calcificadas desde el terciario<sup>8</sup>. En el Gran Caribe, los octocorales han aumentado su abundancia en las últimas décadas con ejemplos notables en las Islas Vírgenes<sup>9</sup> y en la Reserva de la Biosfera de SeaFlower, tanto en aguas someras como en ecosistemas coralinos mesofóticos<sup>10,11</sup>.

Además de seguir el proceso de la evolución de ecosistemas coralinos afectados, el monitoreo de octocorales debe hacerse en casos donde su explotación pueda comprometer la conservación de sus poblaciones<sup>12-14</sup>. Mas recientemente, el seguimiento multitemporal de los octocorales ofrece un modelo para entender el efecto de las anomalías climáticas como ENSO (ver Caso de estudio) y en general el efecto del cambio global, incluyendo la acidificación oceánica<sup>6</sup>. Por lo tanto, métodos para el seguimiento directo de colonias de octocorales, mediante buceo SCUBA, se hacen cada vez más relevantes.

## Objetivos

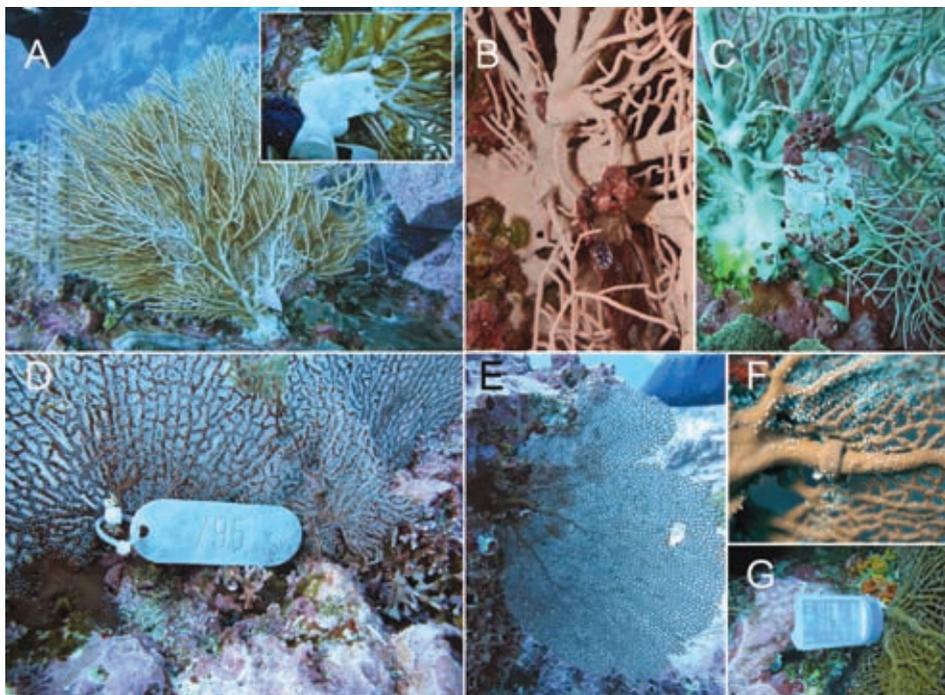
En este capítulo se describen las técnicas de marcaje, así como de foto-monitoreo de octocorales arborescentes. Se exponen los métodos para marcar permanentemente octocorales gorgonáceos en sus troncos basales, sin hacer daño a la colonia, para poder realizar un seguimiento *in situ* individual de su crecimiento y salud en el tiempo, así como evaluar y monitorear la estructura poblacional.

## Procedimientos mínimos de seguridad

Para realizar esta actividad subacuática, se necesitan los procedimientos estándar de buceo científico en aguas abiertas incluyendo acceso a un kit que supla oxígeno médico, primeros auxilios, un bote anclado o esperando en las cercanías, uso de boya cilíndrica “chorizo” inflable en la salida de la inmersión y dispositivos electrónicos de llamado de emergencia en lugares remotos. Se requieren dos buzos avanzados, con especial atención en su buen manejo de la flotabilidad neutral, que se dividan labores, manteniéndose en constante y cercana interacción. Por lo tanto, deben evitar el aleteo con las manos para evitar contacto con el equipo del compañero o sus herramientas. Se recomienda utilizar guantes de caucho para asirse del sustrato de ser necesario en arrecifes rocosos del Pacífico con gran oleaje. Traje completo para protección térmica y evitar contacto con invertebrados urticantes presentes en los octocorales (coral de fuego, hidroides, gusanos de fuego, etc.) o en el plancton (medusas).

## Marcaje de colonias

Se hace necesario marcar las colonias de octocorales objeto de estudio para lograr ubicarlas en una expedición posterior especialmente en lugares con altas densidades poblacionales. Las colonias se pueden marcar sujetándose de su tronco basal, justo antes de su base (Fig. 1). Este es el lugar más resistente de la colonia y donde se genera menos impacto y fricción por ser una porción prácticamente inmóvil del coral. Sugerimos que el marcado conste de dos partes, un amarre plástico, como anclaje a la colonia, y otra amarradera que porte la etiqueta numerada que puede ser de aluminio o acrílico (Fig. 1 A y D). El amarre debe sujetarse firmemente alrededor del tronco de la colonia, evitando la posibilidad que se afloje, pero sin ocasionar un daño al tejido. En



**Figura 1.** Marcaje de colonias de octocorales gorgonáceos. A-B-C. Colonia de *Leptogorgia alba* (detalle: acercamiento de la etiqueta con el número 349), en el momento de ser marcada (A), un año (B) y dos años (C), después; note cómo el tejido de la colonia va recubriendo la etiqueta con el paso del tiempo. D-E-F-G. Colonia de *Pacifigorgia cairnsi* (etiqueta número 795) al momento del marcaje (D-E) y un año después donde la amarradera es casi imperceptible (F). G. La amarradera plástica del marcaje se puede utilizar para el montaje temporal de sensores. Todas las fotos en Isla Malpelo (J.A. Sánchez).

condiciones ideales, la colonia recubre los amarres de anclaje al cabo de seis o menos meses (Fig. 1 B y D). El sistema funciona apropiadamente tanto para colonias arborescentes como reticuladas (abanicos). El punto de anclaje puede servir temporalmente para sujetar pequeños sensores para la medición de temperatura y/o luz (Fig 1G). Además de las especies del Pacífico Oriental Tropical mencionadas en la Figura 1, este método ha sido utilizado previamente con éxito en especies del mar Caribe como *Antilloorgia elisabethae*<sup>13</sup>, *A. bipinnata*<sup>14</sup> y *A. acerosa*<sup>15</sup>.

## Foto-monitoreo

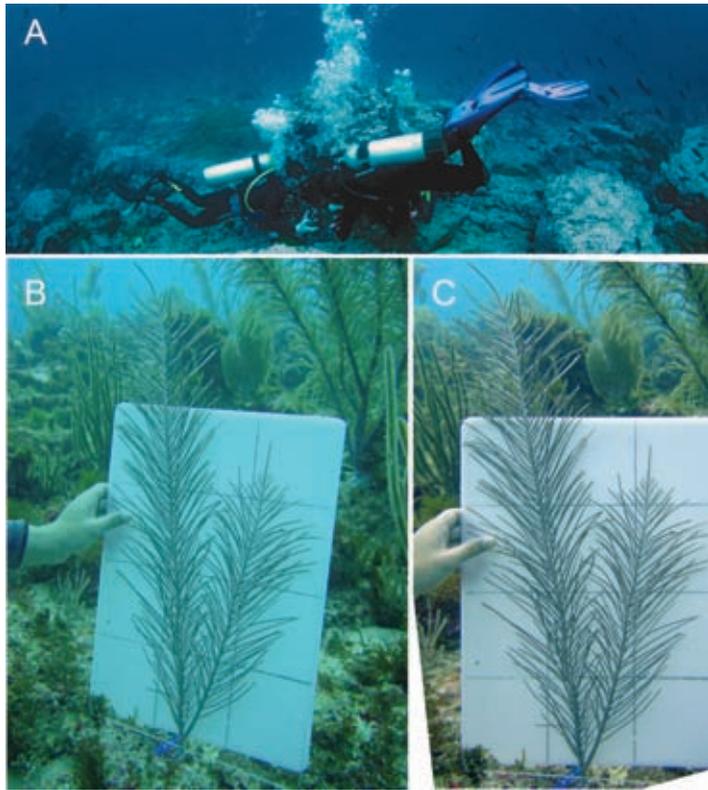
El foto-monitoreo es una técnica ampliamente empleada para rastrear en el tiempo los cambios en crecimiento de las colonias. Para el monitoreo de octocorales se requiere de dos buzos con buenas competencias bajo el agua, en especial de su flotabilidad neutral, para evitar que las aletas generen un daño a la biota arrecifal (Fig. 2A). La situación ideal es que los buzos se posicionen frente a frente, uno de ellos se encarga del fondo del sujeto bajo estudio y el otro de capturar las imágenes. Se recomienda el método desarrollado para *A. elisabethae*<sup>13</sup> que consiste en utilizar un fondo de acrílico blanco con una cuadrícula y otro acrílico transparente que cubre al coral (Fig. 2A-B), con el fin de convertir la colonia sujeto de estudio en una estructura netamente bidimensional.

Alternativamente, se pueden utilizar un fondo transparente y en lugar de cuadrícula se perforan o marcan las esquinas de cada cuadro, como se ha utilizado exitosamente en *Pacifigorgia cairnsi* (Fig. 3). Al convertirse el sujeto en una estructura bidimensional, se puede corregir la distorsión de la cuadrícula mediante software (Adobe-Photoshop<sup>TM</sup>) y convertirla en una imagen simétrica en donde los píxeles se pueden escalar a la medida real de la referencia (Fig. 2B).

### Caso de estudio

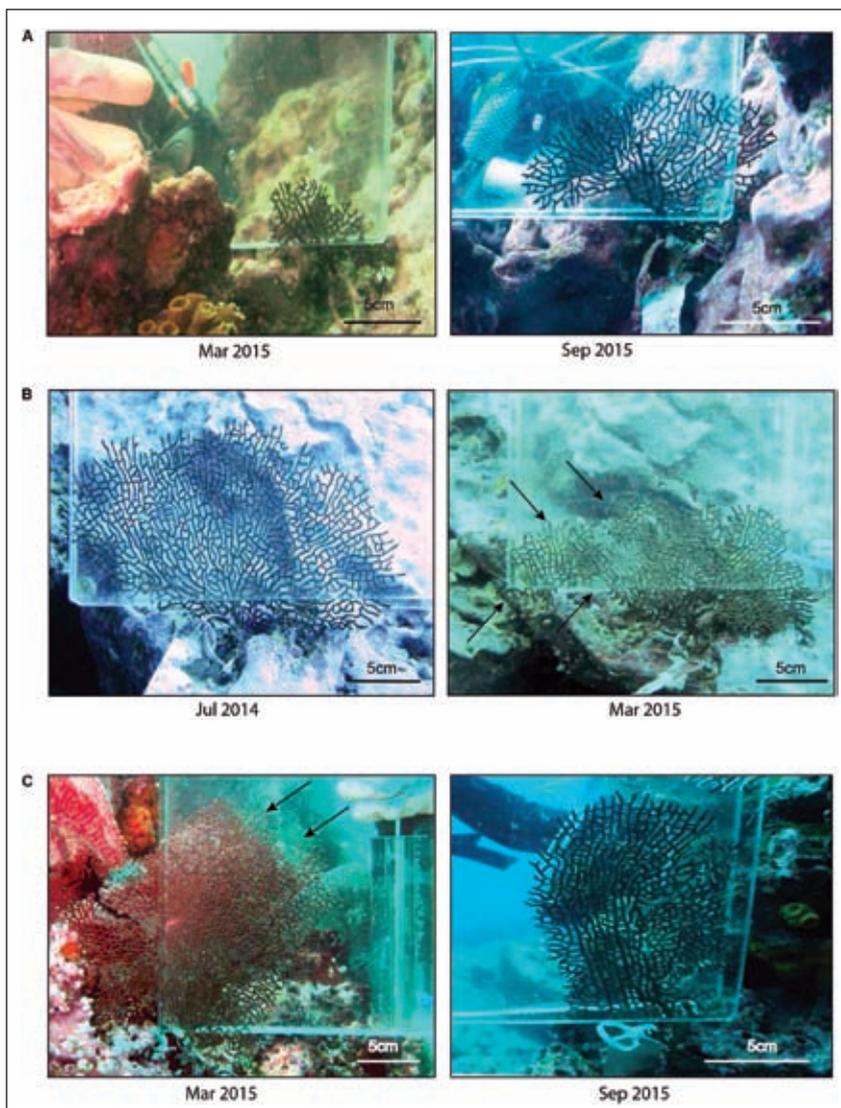
*El efecto de anomalías térmicas en el crecimiento y salud de los octocorales de isla Malpelo, Pacífico Oriental Tropical*

El abanico *Pacifigorgia cairnsi* (Gorgoniidae) ha sido objeto de monitoreo por cerca de una década en la isla Malpelo. Este lugar queda en el área de influencia del fenómeno de El Niño oscilación sur (ENSO, por sus siglas en inglés), lo que aumenta el rango de temperaturas que deben tolerar los corales en esta región. Gracias al marcaje y foto-monitoreo de cientos de colonias, se ha podido establecer que durante las anomalías térmicas los



**Figura 2.** Foto-monitoreo de octocorales gorgonáceos. A. Pareja de buzos en isla Malpelo mostrando la posición ideal para la captura de imágenes de octocorales, frente a frente y manteniendo la flotabilidad neutra sin apoyar la aletas en el fondo. B-C Colonia de *Antillogorgia acerosa* en el banco de Salmedina, Cartagena, Mar Caribe; imagen sin procesar (B), y luego del procesamiento y ajuste a una trama con cuadrículas de 10 x 10 cm<sup>15</sup>.

corales sufren una disbiosis, síndrome del parche necrótico, en donde las bacterias oportunistas del microbioma de *P. cairnsi* aumentan en abundancia, mientras algunos grupos claves de bacteria disminuyen<sup>16</sup>. Esta enfermedad posiblemente se presenta en Pacífico desde 2008 en varias especies de abanicos (ver información suplementaria<sup>17</sup>). Más recientemente, el foto-monitoreo de las colonias ha permitido observar con certeza cuando las colonias crecen, pierden tejido o se enferman a lo largo de varios años de monitoreo<sup>18</sup> (Fig. 3).



**Figura 3.** Colonias de *Pacifigorgia cairnsi* en la isla Malpelo durante dos tiempos de seguimiento. Crecimiento (A); ruptura de tejido (B); recuperación de la colonia luego de una ruptura de tejido (C). Las flechas muestran áreas de rotura de tejido de una colonia sana (B) y enferma (tejido necrótico) (C). Imagen y leyenda tomada de: Quintanilla E, Madurell T, Wilke T & Sánchez JA (2019) Dynamic Interplay of ENSO Events and Local Hydrodynamic Parameters Drives Demography and Health Status of Gorgonian Sea Fan Populations on a Remote Tropical Eastern Pacific Island. *Front. Mar. Sci.* 6:694. doi: 10.3389/fmars.2019.00694, CC BY.

## Recomendaciones

El marcaje y foto-monitoreo de colonia de octocorales arborescentes en el Caribe y Pacífico de Colombia, ha demostrado ser una técnica de buceo científico sencilla, segura y replicable. De especial interés es su gran potencial para el monitoreo de los efectos de las anomalías térmicas y el cambio climático, incluso en lugares tan remotos como la isla Malpelo, en donde contribuye a los procesos de conservación del Santuario de Flora y Fauna-SFF Malpelo del sistema de Parques Nacionales Naturales-Colombia. Al ser los octocorales un componente arrecifal resistente a las condiciones cambiantes, estos métodos contribuyen adicionalmente con el entendimiento de los cambios de fase que se están presentando en varios ecosistemas costeros en especial en los arrecifes coralinos.

**Información suplementaria:** Video: Mortalidad de abanicos de mar, Isla Gorgona  
<https://youtu.be/keiy5ouKAJQ>

## Bibliografía

1. Sánchez, J. A. *et al.* Gorgonian Corals (39). in *Loya et al. (eds) Mesophotic Coral Ecosystems* 727–745 (Springer Nature Switzerland AG, 2019).
2. Sánchez, J. A. Diversity and evolution of octocoral animal forests at both sides of tropical America. in *Marine Animal Forests: The Ecology of Benthic Biodiversity Hotspots* 111–143 (2017).
3. Bates, A. E. *et al.* Climate resilience in marine protected areas and the 'Protection Paradox'. *Biol. Conserv.* 236, 305–314 (2019).
4. Stanley, G. D. The evolution of modern corals and their early history. *Earth-Sci. Rev.* 60, 195–225 (2003).
5. Prada, C., Weil, E. & Yoshioka, P. M. Octocoral bleaching during unusual thermal stress. *Coral Reefs* 29, 41–45 (2010).
6. Gómez, C. E. *et al.* Responses of the tropical gorgonian coral *Eunicea fusca* to ocean acidification conditions. *Coral Reefs* 34, 451–460 (2015).
7. Kocurko, M. J. Shallow-water Octocorallia and related submarine lithification, San Andres island, Colombia. *Tex. J. Sci.* 39, 349–365 (1987).
8. Kocurko, M. J. & Kocurko, D. J. Fossil Octocorallia of the Red Bluff Formation, lower Oligocene, Mississippi. *J. Paleontol.* 66, 594–602 (1992).
9. Lenz, E. A., Bramanti, L., Lasker, H. R. & Edmunds, P. J. Long-term variation of octocoral populations in St. John, US Virgin Islands. *Coral Reefs* 34, 1099–1109 (2015).

10. Sánchez, J. A. *et al.* Steady Decline of Corals and Other Benthic Organisms in the SeaFlower Biosphere Reserve (Southwestern Caribbean). *Front. Mar. Sci.* 6, (2019).
11. Sánchez, J. A. *et al.* Corals in the Mesophotic Zone (40–115 m) at the Barrier Reef Complex From San Andrés Island (Southwestern Caribbean). *Front. Mar. Sci.* 6, (2019).
12. Cadena, N. J. & Sánchez, J. A. Colony growth in the harvested octocoral *Pseudopterogorgia acerosa* in a Caribbean coral reef. *Mar. Ecol.* 31, 566–573 (2010).
13. Lasker, H. R., Boller, M. L., Castanaro, J. & Sánchez, J. A. Determinate growth and modularity in a gorgonian octocoral. *Biol. Bull.* 205, (2003).
14. Sánchez, J. A. & Lasker, H. Do multi-branched colonial organisms exceed normal growth after partial mortality? *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 271, S117–S120 (2004).
15. Cadena, N. J. & Sánchez, J. A. Colony growth in the harvested octocoral *Pseudopterogorgia acerosa* in a Caribbean coral reef. *Mar. Ecol.* 31, 566–573 (2010).
16. Quintanilla, E. *et al.* Local confinement of disease-related microbiome facilitates recovery of gorgonian sea fans from necrotic-patch disease. *Sci. Rep.* 8, 14636 (2018).
17. Sánchez, J. A. *et al.* Octocoral densities and mortalities in Gorgona Island, Colombia, Tropical Eastern Pacific. *Rev. Biol. Trop.* 62, 209–219 (2014).
18. Quintanilla, E., Madurell, T., Wilke, T. & Sánchez, J. A. Dynamic Interplay of ENSO Events and Local Hydrodynamic Parameters Drives Demography and Health Status of Gorgonian Sea Fan Populations on a Remote Tropical Eastern Pacific Island. *Front. Mar. Sci.* 6, (2019).

## Exploración de los ecosistemas coralinos mesofóticos (30-120 m) mediante buceo técnico de circuito cerrado (CCR-TRIMIX)

---

Juan A. Sánchez\*  
Julio Andrade\*  
Luisa F. Dueñas\*\*  
Nacor Bolaños\*\*\*

---

En la zona del crepúsculo marino, donde penetra menos del 1% de la luz que llega a la superficie del océano<sup>1</sup>, se encuentran los ecosistemas coralinos mesofóticos (30-200 m de profundidad). Como cualquier otro arrecife, son fondos predominantemente duros con la presencia de organismos formadores de arrecifes como corales y algas coralináceas. Los arrecifes mesofóticos se encuentran en muchas ocasiones precedidos por los arrecifes someros (0-30 m) y pueden continuar hacia grandes profundidades convirtiéndose en arrecifes de profundidad<sup>2</sup>; en ambos casos la separación no es abrupta y se da a lo largo de un gradiente de cambios en las condiciones y de las especies constructoras de arrecifes.

Los ecosistemas coralinos mesofóticos (ECM) están poco explorados lo que ha despertado un gran interés por estudiarlos. Esto se ha dado por un impedimento obvio dado que están por debajo de los límites del buceo SCUBA recreativo, pero por otro lado son demasiado someros para la exploración con vehículos remotos o submarinos. Como era de esperarse, se ha encontrado recientemente que los corales y otros organismos de esta zona presentan

---

\* Laboratorio de Biología Molecular Marina (BIOMMAR). Departamento de Ciencias Biológicas-Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

\*\* Departamento de Biología, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá

\*\*\* Corporación para el Desarrollo Sostenible del Departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina "CORALINA"

asociaciones simbióticas y adaptaciones únicas<sup>3-7</sup>. Por otro lado, dado que los arrecifes someros han sido afectados por anomalías térmicas en las últimas tres décadas<sup>8,9</sup>, se ha sugerido que los arrecifes mesofóticos pueden actuar como un refugio debido a las condiciones estables y rara vez alteradas de este ambiente<sup>10</sup>. Muchas especies de peces, corales y otros invertebrados de los arrecifes someros se encuentran también en los arrecifes mesofóticos y podrían contribuir a la recuperación de poblaciones someras afectadas. Por estas dos razones, se hace prioritario y urgente la inclusión de los arrecifes mesofóticos dentro de los planes de manejo de zonas que incluyan estas profundidades (30 a 200 m).

En este capítulo exponemos las técnicas y los alcances del buceo técnico de circuito cerrado CCR (por sus siglas en inglés: Closed Circuit Rebreather) y aire enriquecido con Helio (trimix) para la investigación en los ECM de varias regiones del Caribe colombiano: la isla de San Andrés (Reserva de Biosfera de SeaFlower, archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina), el Parque Nacional Natural Corales de Profundidad y los bancos coralinos aledaños a isla Barú, Bolívar.

## **Procedimientos mínimos de seguridad**

Ante todo, la incursión en las técnicas de buceo científico requiere de práctica constante y entrenamiento completo previo a un nivel de buzo de rescate o idealmente *divemaster*, cuando se parte desde las bases del buceo recreativo. Posteriormente se deben completar los cursos introductorios de buceo técnico incluyendo el montaje lateral (*sidemount*), nitrox técnico, buzo de descompresión, trimix, trimix hipóxico y por supuesto buzo de recirculador CCR. Además, se ha mostrado determinante que todos los equipos cuenten con la suficiente redundancia ante una eventual falla de cualquier componente. Cuando nuestro grupo de investigación adquirió estos equipos (Megalodon CCR) se nos exigía recibir la certificación del equipo con uno de sus instructores y distribuidores autorizados por lo que además de tener que hacer el curso para el equipo, tuvimos que hacer entrenamiento en cavernas, introducción a cuevas, traje seco, cuevas y finalmente circuito cerrado CCR Trimix. Este equipo que permite teóricamente hasta 12 horas de buceo continuo se ha utilizado mayoritariamente para la exploración de cuevas sumergidas, por lo que tuvimos que familiarizarnos con este ambiente, superar la potencial ansiedad que representa la imposibilidad de salir a la superficie en cualquier momento y el encierro de estos ambientes. El entrenamiento para CCR Trimix requiere, por lo tanto, una buena preparación física y mental. El

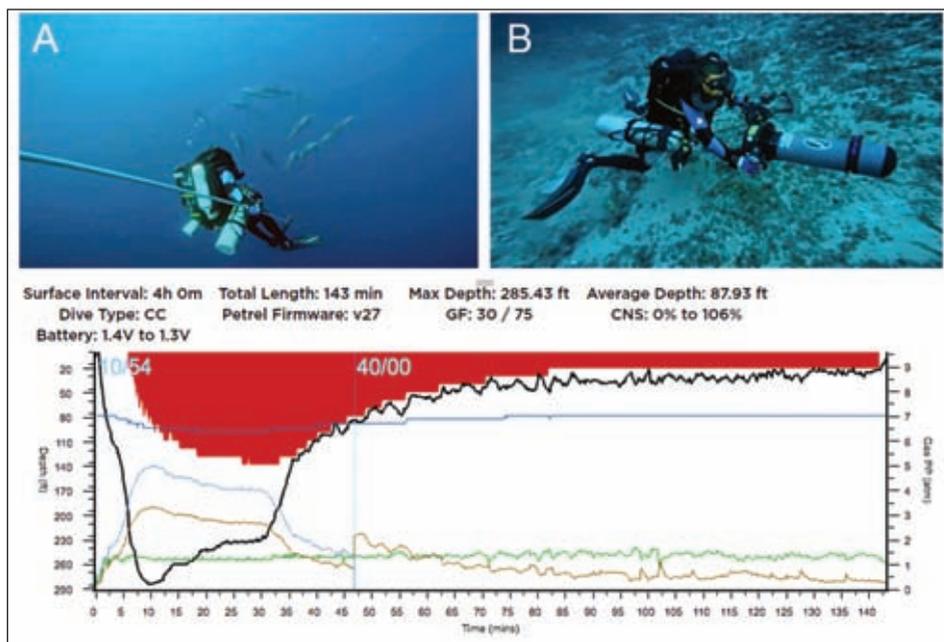
equipo debe contar con contingencia (*bail-out*) completa, que incluye tanques y reguladores de circuito abierto para salir de la inmersión en caso de daño del CCR. El CCR más *bail-out* puede superar los 70 kilogramos, dependiente de lo profundo que se planifique la inmersión. Posteriormente, adicionamos al equipo dispositivos de propulsión sumergible “*scooters*” (DPV, por sus siglas en inglés). Aunque esto es adicional, los *scooters* facilitan enormemente la movilidad, en especial para mantener el ritmo cardíaco y de respiración lo más relajado posible.

Familiarizarse con el equipo fuera y dentro del agua, gracias a un constante entrenamiento de las técnicas de buceo con circuito cerrado es la única forma de practicar esta actividad de forma segura. Se requiere perfeccionar la flotabilidad neutral (que generalmente no se logra realmente en buceo recreativo), la patada de rana, así como ajustar de la forma más hidrodinámica y balanceada los equipos. Todo esto pasa por mantener buenas posturas corporales durante varias horas. Se requiere de una planificación concisa de cada inmersión con un plan alternativo impreso (iDeco Pro: Tabla 1) en caso de que los computadores fallen o se queden sin batería. Se debe contar con un plan de contingencia ante una eventual emergencia bajo el agua; un soporte permanente en la superficie desde el bote, teniendo en mente un posible traslado a un centro de salud o a la cámara de descompresión más cercana. Afortunadamente, nuestro equipo nunca tuvo una emergencia, más allá de tener que usar el *bail-out* por alguna falla en el equipo de circuito cerrado y salir sin mayor inconveniente, con el soporte de circuito abierto. Estos son equipos cuya electrónica se afecta acumulativamente con la humedad y agua salada, por lo que eventualmente se presentan fallos y se hace necesario pasar al soporte de emergencia (*bail-out*). Esta situación ha venido mejorando con el crecimiento de la industria del CCR y desarrollo de equipos más sofisticados. Sin embargo, aún existen mayores desafíos tecnológicos: i) una lectura correcta de la presión parcial de oxígeno y ii) un sensor eficaz del nivel de dióxido de carbono.

## **Materiales y métodos**

En los sitios de muestreo más someros como el Bajo Frijol en el PNN Corales de Profundidad se realizaron inmersiones de hasta una hora, lo que permitió realizar censos cuantitativos de peces y colecciones de diversos organismos. Los datos de censos de peces son comparables con resultados previos obtenidos usando circuito abierto<sup>11</sup>. Las inmersiones profundas (70-120 m) se limitaron a 10-15 minutos en la profundidad máxima, otros 15 minutos

de observaciones manteniendo un ascenso suave (3 m/min) y el resto del tiempo se dedicó a realizar la descompresión (Figura 1). En el PNN Corales de Profundidad se contó con un bote anclado firmemente al fondo y un bote de apoyo suelto, listo para cualquier eventualidad, dado que por la fuerza de las corrientes el bote anclado no alcanzaría a subir el ancla e ir a auxiliar a un buzo en la superficie. En la isla de San Andrés, gracias a la ausencia de corrientes, se tuvo solamente un bote anclado en cercanía al sitio de la inmersión (Trampa Tortuga). Al llegar al fondo, los buzos trazaron una línea de carretera desde el ancla y realizaron sus observaciones y muestreos siempre con esta referencia. Durante la inmersión, uno de los buzos realizó censo de peces, mientras el otro realizó observaciones del fondo. Se obtuvieron muestras de organismos de interés y se tomó fotografías con lente macro (Nikon D7000) para detallar estructuras relevantes que permite posteriormente la identificación certera de los organismos. Contar con el *scooter* (DPV) maximizó el área explorada, en este caso con la guía de un rumbo de compás desde el ancla (Figura 1B). Igualmente, se contó con buzos de apoyo, quienes registraron la totalidad de las inmersiones en video y obtuvieron imágenes generales de



**Figura 1.** Buceo con CCR-trimix en la herradura, PNNCrP. A. Parada de seguridad en la línea del ancla (delfines nariz de botella en el fondo). B. Movilización con DPV (fotos cortesía: Deibis Seguro). Abajo perfil de una inmersión hasta 87 m de profundidad (Shearwater Petrel).

los lugares de muestreo. Para garantizar la seguridad de cada inmersión se contó como sistema de apoyo de emergencia (*bail-out*) para cada buzo CCR tres tanques con sistema de circuito abierto, mezcla de fondo-trimix hipóxico, mezcla del viaje EAN 40 % y oxígeno 98 % para deco final: (Tabla 1).

**Tabla 1.** Ejemplo de Plan de buceo para CCR y Trimix hipóxico hasta 87 m (iDeco Pro) con mezcla de fondo Trimix 10/54 (oxígeno %/helio %) en CCR y bail-out con tanques de Trimix 15/40, Nitrox 40 % y oxígeno 100 %.

Requerimientos de gas y paradas de descompresión para el equipo CCR luego de 15 minutos a 87 m	Requerimientos de gas y paradas de descompresión para el equipo alternativo (bail-out) de circuito abierto luego de 15 minutos a 87 m
Dive: 87m for 15 [ 15 ] on Tx 10/54 - 1.20 (pO <sub>2</sub> )	Dive: 87m for 15 [ 15 ] on Tx 10/54 - 1.20
Asc.: 77m for 1 [ 16 ] on Tx 10/54 - 1.20	Asc.: 77m for 1 [ 16 ] on Tx 15/40
Asc.: 67m for 1 [ 17 ] on Tx 10/54 - 1.20	Asc.: 77m for 1 [ 17 ] on Tx 15/40
Deco: 57m for 1 [ 18 ] on Tx 10/54 - 1.20	Asc.: 67m for 1 [ 18 ] on Tx 15/40
Deco: 54m for 1 [ 19 ] on Tx 10/54 - 1.20	Asc.: 57m for 1 [ 19 ] on Tx 15/40
Deco: 51m for 1 [ 20 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 51m for 1 [ 20 ] on Tx 15/40
Deco: 48m for 1 [ 21 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 48m for 1 [ 21 ] on Tx 15/40
Deco: 45m for 1 [ 22 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 45m for 1 [ 22 ] on Tx 15/40
Deco: 42m for 1 [ 23 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 42m for 1 [ 23 ] on Tx 15/40
Deco: 39m for 1 [ 24 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 39m for 1 [ 24 ] on Tx 15/40
Deco: 36m for 1 [ 25 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 36m for 1 [ 25 ] on Tx 15/40
Deco: 33m for 1 [ 26 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 33m for 3 [ 28 ] on Tx 15/40
Deco: 30m for 1 [ 27 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 30m for 1 [ 29 ] on EAN40
Deco: 27m for 1 [ 28 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 27m for 1 [ 30 ] on EAN40
Deco: 24m for 2 [ 30 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 24m for 2 [ 32 ] on EAN40
Deco: 21m for 3 [ 33 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 21m for 3 [ 35 ] on EAN40
Deco: 18m for 4 [ 37 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 18m for 3 [ 38 ] on EAN40
Deco: 15m for 4 [ 41 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 15m for 4 [ 42 ] on EAN40
Deco: 12m for 6 [ 47 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 12m for 7 [ 49 ] on EAN40
Deco: 9m for 8 [ 55 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 9m for 10 [ 59 ] on EAN40
Deco: 6m for 34 [ 89 ] on Tx 10/54 - 1.20	Deco: 6m for 33 [ 92 ] on 100% O <sub>2</sub>
Consumo de gas: Tx 10/54 97.9 ltr	Consumo de gas: Tx 10/54 16.5 ltr Tx 15/40 51.6 cuft EAN40 43.8 cuft 100% O <sub>2</sub> 32.8 cuft

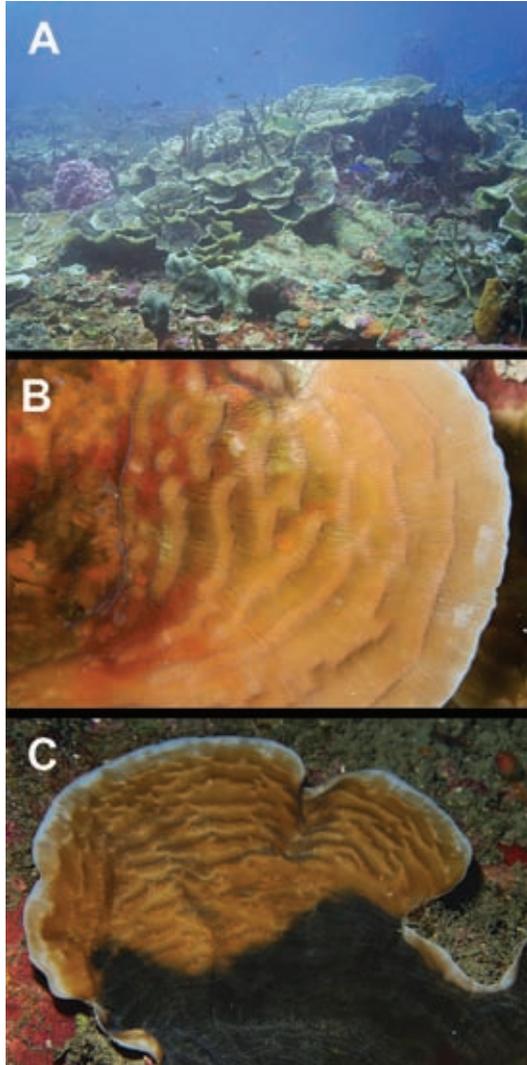
### Caso de estudio

*Conectividad y endosimbiontes en el coral mesofótico especialista*

*Agaricia undata*

Explorar los ecosistemas mesofóticos mediante buceo CCR y técnicas de buceo enriquecido con Trimix ha permitido conocer la comunidad coralina

en ECM, incluyendo especialistas en esta zona como lo es *A. undata*, un coral en forma de plato que tiende a dominar el fondo arrecifal por debajo de los 35-40 m de profundidad.



**Figura 2.** Ecosistemas coralinos mesofóticos en el Caribe colombiano A. Sobre el bajo ‘Trompadas’ frente a la isla Barú a 35 m de profundidad, con diversas especies de *Agaricia*. B. La especie *Agaricia undata* a 45 m de profundidad en el bajo Octubre Rojo, frente a la isla Barú, Cartagena. C. *A. undata* en 80 m de profundidad en la isla de San Andrés, en la localidad de ‘Trampa Tortuga’. La coloración verde oscura a negra en B y C corresponde al alga endolítica *Ostreobium*.

Algunos de los bancos de origen diapírico en la plataforma continental frente a Barú, presentan grandes abundancias de este coral (Fig. 2A) entre 35 y 50 m de profundidad. Esta especie se observa hasta los 90 m entre los arrecifes de San Andrés y en el PNN corales de profundidad. Debido a la diferencia en su rango de profundidad entre las regiones cercanas a la costa y las costa afuera en la plataforma (PNN) junto a la isla de San Andrés, era de gran interés examinar la estructura y conectividad genética dentro y entre estos ambientes y lugares geográficos, así como los endosimbiontes fotosintéticos asociados a una especie que habita por debajo de la profundidad de compensación de la fotosíntesis.

Los resultados de la genómica poblacional revelaron que la especie no se estructura entre profundidades, mientras sí se diferencia claramente por su región geográfica<sup>12</sup>. El mismo patrón se observó para el microbioma, con un núcleo de microorganismos de más de 300 OTU y con los nueve tipos de zooxantelas del género *Cladocopium* (Symbiodinaceae) encontrados. Lo inesperado de este estudio se relacionó con el hallazgo de la presencia tan notable de algas endolíticas (*Ostreobium*, Caulerpales) tan cerca de la superficie coralina (Figs. 2B-C), el cual oscurecía notablemente algunas colonias (Fig. 2C). Resultó que *A. undata* alberga más tipos diferentes de *Ostreobium* que de *Cladocopium*, además de que existía una clara estructura biogeográfica. El alga endolítica modifica la morfología del coral subiendo justo a la superficie coralina y generando tuberías entre las estructuras (costas) coralinas<sup>13</sup>. Aunque el hecho de que las algas endolíticas se asocian mutualistamente con corales escleractínios ya había sido sugerido al ofrecer un “microclima” lumínico favoreciendo a las zooxantelas<sup>14</sup>, no se conocía la modificación de sus esqueletos por el alga ni su gran diversidad asociada a una sola especie de coral. Lo innovador de estos resultados se puede atribuir en gran medida a la poca exploración en los ECM y a la posibilidad de realizar muestreos detallados mediante buceo técnico CCR-Trimix.

## Recomendaciones

El buceo con circuito cerrado CCR, y las técnicas de Trimix hipóxico, son la forma más segura de realizar inmersiones hasta 120 m de profundidad, ofreciendo hasta 30 minutos de exploración en el fondo para actividades de buceo científico. Como se expuso en el caso de estudio, los hallazgos en la zona mesofótica saltan a la vista y justifican la inversión en equipos y entrenamiento. No obstante, es una actividad de mucho riesgo con muchas posibilidades de error desde el usuario y con una tecnología que aún está en desarrollo y que presenta fallas eventuales en sus sistemas electrónicos.

Nuestra recomendación es replantear el uso de esta técnica en buceo científico para hacer uso de larga duración en profundidades inferiores a 60 m, ofreciendo varias horas de trabajo efectivo, minimizando las posibles contingencias y facilitando la gestión de emergencias. Asimismo, generar grupos que colaboren y entrenen frecuentemente esta técnica, beneficiándose de una economía de escala y del conocimiento colectivo. Los muestreos a profundidades mayores pueden hacerse de forma más segura con equipos remotos robóticos (ROV por sus siglas en inglés), hoy en día cada vez más accesibles.

## Bibliografía

1. Lesser MP, Slattery M, Leichter JJ. Ecology of mesophotic coral reefs. *J Exp Mar Biol Ecol.* 2009;375: 1-8.
2. Olson JB, Kellogg CA. Microbial ecology of corals, sponges, and algae in mesophotic coral environments. *FEMS Microbiol Ecol.* 2010;73: 17-30.
3. Frade PR, De Jongh F, Vermeulen F, Van Bleijswijk J, Bak RPM. Variation in symbiont distribution between closely related coral species over large depth ranges. *Mol Ecol.* 2008;17: 691-703. doi:10.1111/j.1365-294X.2007.03612.x
4. Kahng SE, Copus JM, Wagner D. Recent advances in the ecology of mesophotic coral ecosystems (MCEs). *Curr Opin Environ Sustain.* 2014;7: 72-81.
5. Bongaerts P, Carmichael M, Hay KB, Tonk L, Frade PR, Hoegh-Guldberg O. Prevalent endosymbiont zonation shapes the depth distributions of scleractinian coral species. *R Soc Open Sci.* 2015;2: 140297.
6. Bongaerts P, Frade PR, Hay KB, Englebert N, Latijnhouwers KR, Bak RP, et al. Deep down on a Caribbean reef: lower mesophotic depths harbor a specialized coral-endosymbiont community. *Sci Rep.* 2015;5.
7. Sánchez JA, Dueñas, L.F., Rowley, S.J., González, F.L., Vergara, D.C., Montañño-Salazar, S.M., et al. Gorgonian Corals (39). Loya et al (eds) Mesophotic Coral Ecosystems. *Springer Nature Switzerland AG*; 2019. pp. 727-745. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0_39)
8. Gardner TA, Cote IM, Gill JA, Grant A, Watkinson AR. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science.* 2003;301: 958-961.
9. Hughes TP, Baird AH, Bellwood DR, Card M, Connolly SR, Folke C, et al. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science.* 2003;301: 929-933.
10. Bongaerts P, Ridgway T, Sampayo EM, Hoegh-Guldberg O. Assessing the 'deep reef refugia' hypothesis: focus on Caribbean reefs. *Coral Reefs.* 2010;29: 309-327.
11. Sánchez JA, Ochoa E, Andrade J. From Open to Closed Circuit: Pros and Cons for studying coral reefs organisms in the Caribbean. *Joint International Scientific Diving Symposium.* Curacao; 2013. pp. 265-267.

12. González-Zapata FL, Bongaerts P, Ramírez-Portilla C, Adu-Oppong B, Walljasper G, Reyes A, *et al.* Holobiont Diversity in a Reef-Building Coral over Its Entire Depth Range in the Mesophotic Zone. *Front Mar Sci.* 2018;5. doi:10.3389/fmars.2018.00029
13. González-Zapata FL, Gómez-Osorio S, Sánchez JA. Conspicuous endolithic algal associations in a mesophotic reef-building coral. *Coral Reefs.* 2018;37: 705–709.
14. Fine M, Loya Y. Endolithic algae: an alternative source of photoassimilates during coral bleaching. *Proc R Soc B Biol Sci.* 2002;269: 1205–1210. doi:10.1098/rspb.2002.1983



## Técnicas para el monitoreo del crecimiento invasivo del octocoral *Carijoa riisei* “Coral copo de nieve” en el Frente Ecuatorial, Pacífico Oriental Tropical

Karla B. Jaramillo\*  
Thierry Pérez\*\*

El Frente Ecuatorial, en la parte sur de la región del Pacífico Oriental Tropical (POT), se ha caracterizado como un *hotspot* de biodiversidad funcional debido a la mezcla de aguas cálidas y frías<sup>1</sup>. Sin embargo, varios estudios han confirmado un desequilibrio del ecosistema por el comportamiento agresivo del coral blando *Carijoa riisei* (Cnidaria: Octocorallia, familia Clavulariidae) también llamado por su forma y color “coral copo de nieve”, donde *C. riisei* se encuentra amenazada como especie invasora en las costas del POT<sup>2,3</sup>. A pesar de que existen varias hipótesis sobre su origen y la razón de su carácter invasivo, *C. riisei* continúa propagándose por todo el mundo bajo los trópicos y todavía existe un vacío de conocimiento relacionado a su expansión y a la afectación causada a los arrecifes rocosos del POT<sup>3,4</sup>.

Actualmente, son pocos los reportes sobre su presencia en algunos arrecifes rocosos del Frente Ecuatorial registrados en la última década<sup>5,6</sup>. Observaciones *in situ* de buzos recreativos han indicado que la tasa de crecimiento de *C. riisei* ha ido en aumento desde hace aproximadamente 6 años, suposición que posteriormente fue confirmada por Steiner *et al.* (2018)<sup>7</sup>. Además, dicho

---

\* Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas, CENAIM. Código postal (090211) Guayaquil, Ecuador.

\*\* Mediterranean Institute of Marine and Terrestrial Biodiversity and Ecology (IMBE). Aix Marseille University, CNRS, IRD, Avignon University, Station marine. Provence, France

crecimiento excesivo de *C. riisei* ha causado graves daños a los octocorales autóctonos, en particular a los miembros del género *Muricea* (Alcyonacea: Octocorallia) y también a algunos corales pétreos<sup>7</sup>. Por lo tanto, es indispensable llevar un monitoreo del crecimiento y expansión de este coral blando sobre las poblaciones de octocorales, para evaluar el estado de conservación y la evolución del ecosistema afectado. El seguimiento de la expansión de *C. riisei* nos puede brindar respuestas para entender mejor los efectos del cambio climático, acidificación oceánica y de fenómenos naturales como ENSO. Consecuentemente, los monitoreos mediante buceo SCUBA, se hacen cada vez más indispensables.

## Objetivos

En este capítulo, se describen las técnicas de monitoreo y medición, así como de foto-transecto de colonias de octocoral. Se enseñan métodos para realizar un seguimiento *in situ* del crecimiento y expansión del coral blando *C. riisei* sobre los octocorales nativos del Frente Ecuatorial, con el propósito de evaluar la supervivencia de las colonias de octocoral y para valorar salud y composición del ecosistema arrecifal a través del tiempo.

## Procedimientos mínimos de seguridad

Para esta actividad, es fundamental conocer el instructivo estándar de buceo científico, con un plan establecido para optimizar las operaciones de buceo SCUBA (*Briefing*, plan de emergencia, plan de monitoreo y *debriefing*), un buzo líder encargado de la logística y uno auxiliar para asistir en la expedición, revisión y mantenimiento de los equipos antes de los buceos. Es importante disponer de kits de oxígeno y de primeros auxilios, así como de dispositivos electrónicos (radios y teléfono satelital) para llamadas de emergencia. Al salir de la inmersión se recomienda contar con un marinero de experiencia local, un bote con escalera y usar boyas inflables de emergencia “salchichón” para alertar a otras embarcaciones sobre su salida. Se requiere de buzos avanzados que utilicen correctamente el equipo SCUBA y con experiencia en fotografía submarina, comunicación subacuática y en el manejo de instrumentos de medición (transectos, cinta métrica, cuadrantes). En caso de ser necesario, utilizar guantes de neopreno para sujetarse del sustrato rocoso y evitar ser desplazado por el oleaje y fuertes corrientes del Frente Ecuatorial. También, utilizar un traje de neopreno (3–5 mm), dependiendo de la época del año, para protegerse del contacto con organismos urticantes y prevenir una hipotermia.

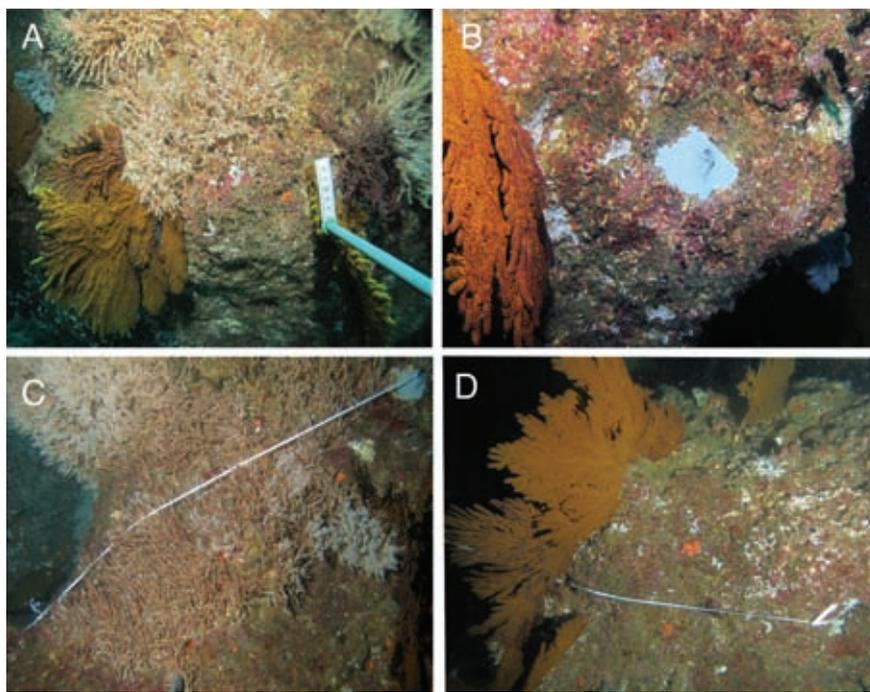
## Materiales y métodos

### *Marcaje de colonias*

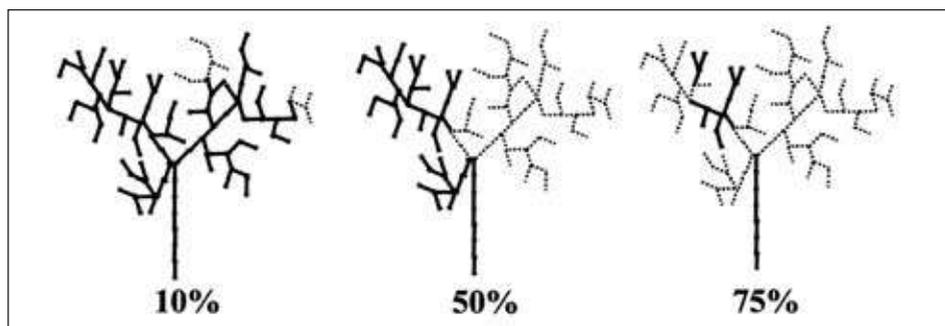
Para realizar esta actividad subacuática, se requiere la construcción previa del material de campo para el monitoreo de las colonias de octocoral, entre estos: la estructura de un foto-cuadrante hecho de tubo de PVC de 1 m x 50 cm x 1 cuadrado de 50 x 50 cm más la colocación del soporte metálico de la cámara digital (dimensión adecuada para una cámara básica con lente de 28 o 35 mm) para la obtención de imágenes 2D. El transecto comprende 30 m de longitud y está representado por una banda elástica blanca para mejor visibilidad bajo el agua y como referente para regresar siempre al mismo sitio. Para fijar el transecto, se utiliza un pegamento tipo resina compuesta que va adherido al sustrato rocoso, donde argollas de tornillo son enroscadas en un taco de fijación plástico (tipo Fisher) a una distancia de 10 m colonia<sup>-1</sup> del octocoral nativo en interacción con *C. riisei*. El amarre del transecto debe sujetarse firme por debajo de las colonias de estudio, evitando que se afloje, pero sin ocasionar daños a otros invertebrados sésiles. (Fig. 1 A, B, C y D). Una vez colocado el transecto, el buzo empieza a monitorear las colonias afectadas por *C. riisei*, utilizando un tablero de apuntes, hojas subacuáticas preimpresas con el bosquejo del octocoral afectado (Fig. 2) y una cinta métrica para registrar datos importantes de la interacción ecológica:

- Número de transecto.
- Número de cuadrante.
- Nombre de la especie o identificación de campo.
- Altura máxima del octocoral nativo (ejemplo *Muricea* sp.).
- Tasa de necrosis (%) a lo largo del tallo del octocoral (Fig. 2).
- Presencia/interacción con *C. riisei* (sí/no).
- Porcentaje (%) de sobrecrecimiento de *C. riisei*.
- Observaciones.
- Referencias del sitio.
- Área de estudio.

Métodos similares han sido utilizados previamente con éxito en otras áreas del POT<sup>2</sup>, Caribe y en el mar Mediterráneo<sup>8</sup>. Además, el tamaño de los cuadrantes y la longitud del transecto pueden ser adaptados (más común disminuirlos) a otros estudios de corales blandos.



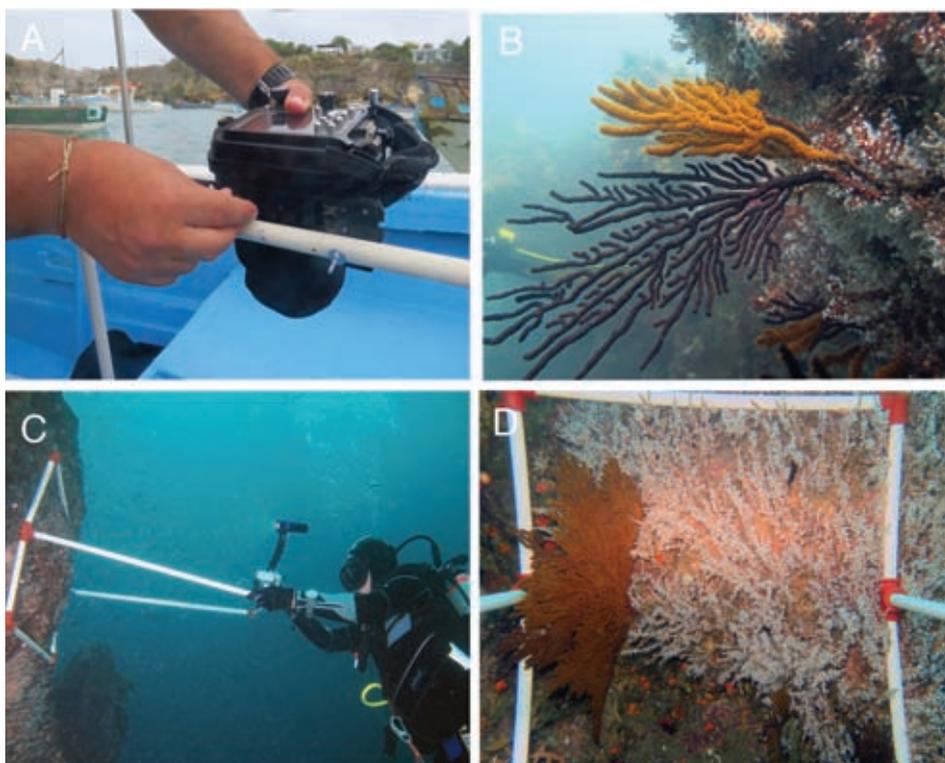
**Figura 1.** Colocación del transecto para el monitoreo del crecimiento y expansión de *C. riisei* sobre octocorales nativos del género *Muricea* en el Frente Ecuatorial. A. Tubo-barra de PVC con una pequeña regleta de aluminio como referencia para calcular el tamaño de los organismos. B. Resina compuesta adherida al sustrato rocoso para la fijación del transecto. C-D. Banda elástica que representa al transecto y sujetado a las argollas atornilladas en la resina.



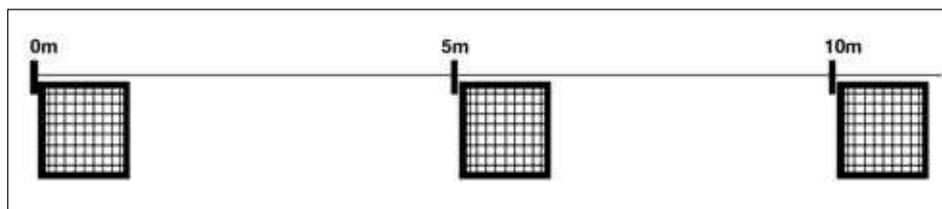
**Figura 2.** Ejemplos de tasas de necrosis en Octocorallia. Imagen © tomada de: Pérez, T. *et al.* Mortalité massive d'invertébrés marins: un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, Vol. 323, no 10: 853-865. doi: [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)01237-3](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)01237-3). CC BY-NC

## Foto-transecto

El foto-transecto es una herramienta del buceo científico utilizada internacionalmente para realizar monitoreos submarinos y mantener un registro sistematizado de las especies presentes y de las actividades antropogénicas y/o naturales que intervienen con las mismas. Es una técnica aplicada para observar los cambios en la composición de la fauna sésil a través del tiempo. Además, se ha implementado como una herramienta útil dentro de las áreas protegidas, obteniendo excelentes resultados para reforzar las medidas de manejo y a su vez comprobar sus esfuerzos de conservación de las especies en estos ecosistemas <sup>9,10</sup>.



**Figura 3.** Foto-transecto del coral blando *C. riisei* y octocorales nativos del Frente Ecuatorial. A. Instalación de la cámara fotográfica en la estructura del cuadrante de PVC. B. Crecimiento de *C. riisei* sobre el octocoral *Muricea plantaginea*. C. Buzo avanzado mostrando la posición recta en frente de la colonia a ser monitoreada para la captura de los foto-cuadrantes. D. Ejemplo de la captura de un foto-cuadrante.



**Figura 4.** Ejemplo de la posición del cuadrante a lo largo del transecto.

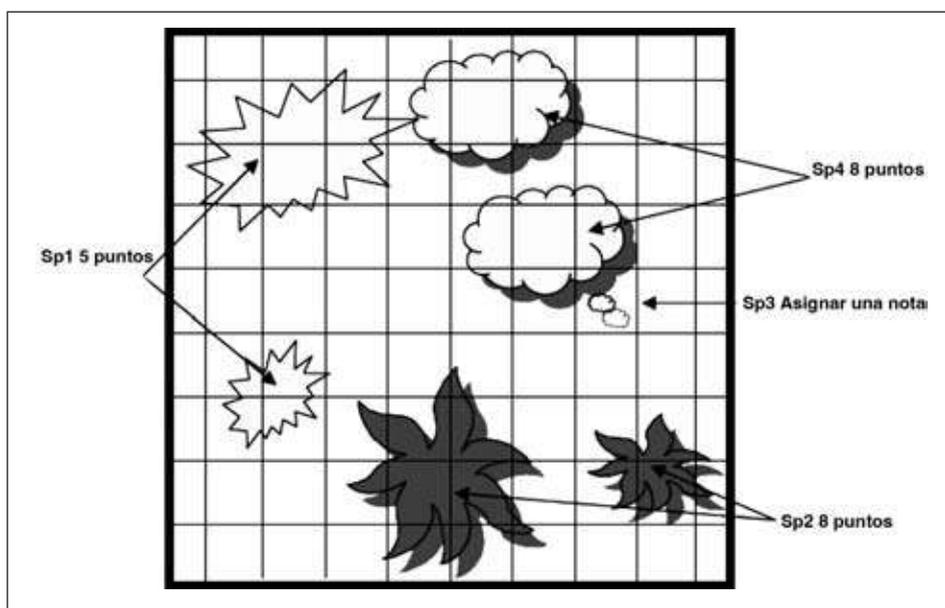
Para el seguimiento de las colonias de octocorales afectadas por *C. riisei* se requiere de dos buzos de nivel avanzado, con buenas habilidades subacuáticas de control de flotabilidad, profundidad y manejo de corrientes, para conservar la fragilidad y proteger la fauna arrecifal del aleteo de los buzos (Fig. 3C). Lo ideal es que un buzo se encargue de colocar y retirar el transecto, además de capturar los foto-cuadrantes para el estudio, mientras el otro buzo se encarga de la medición de las colonias y la recopilación de datos. Los cuadrantes se colocan de forma sistemática a intervalos de 5 m a lo largo de un transecto fijo de 30 m sobre una pared del arrecife rocoso. El número de cuadrantes es establecido con base en un balance entre el tiempo de inmersión y la curva de saturación del porcentaje de cobertura de *C. riisei*. (Fig. 3 C-D). Si una especie no es identificada, se recomienda hacer un bosquejo del organismo, acompañado de una descripción morfológica y una fotografía. Los siguientes elementos deberán ser considerados:

- a. Forma de crecimiento (incrustante, ramificada, erecta).
- b. Color.
- c. Textura.
- d. Substrato sobre el cual crece.
- e. Datos físicos (profundidad, temperatura, fuerza del oleaje, presencia de corrientes, visibilidad, presencia/ausencia de la termoclina y anotar su profundidad).

Aquellos organismos que no pudieron ser identificados bajo el agua deberán ser colectados para su posterior identificación.

Además, es un método no invasivo y fácil de aplicar. Se determina de forma directa por medio del buceo SCUBA y el uso de una cámara digital muy básica de vídeo o fotografía y es también adecuado para cuadrantes más pequeños (25 x 25 cm), por ejemplo, para el uso en cuevas. El método consiste en emplear un cuadrante de fondo llano para obtener una imagen de la colonia

objeto de estudio en una estructura 2D (bidimensional). Posterior a ello, las imágenes pueden ser analizadas en diferentes softwares (algunos de acceso libre), por ejemplo: Adobe Photoshop TM, CPCe o PhotoQuad, utilizando una trama cuadriculada de 10 x 10 cm, con el fin de convertir en una imagen simétrica usando los pixeles para llevar a la medida real de referencia <sup>11</sup>. Para determinar el porcentaje de cobertura de *C. riisei* se evalúa el número de intersecciones que cubren en el cuadrante muestral (Fig. 5). Si algunos organismos están presentes, pero no caen dentro de los puntos de intersección, se le asigna una nota para documentar su presencia dentro del cuadrante.



**Figura 5.** Ejemplo de un cuadrante de PVC con organismos sésiles y sus puntos de intersección para la respectiva estimación de cobertura de *C. riisei* en el sustrato. Imagen © tomada y modificada de: Banks, S. *et al.* 2016. Manual de Monitoreo Submareal. Conservación Internacional Ecuador y Fundación Charles Darwin. Quito, Ecuador.

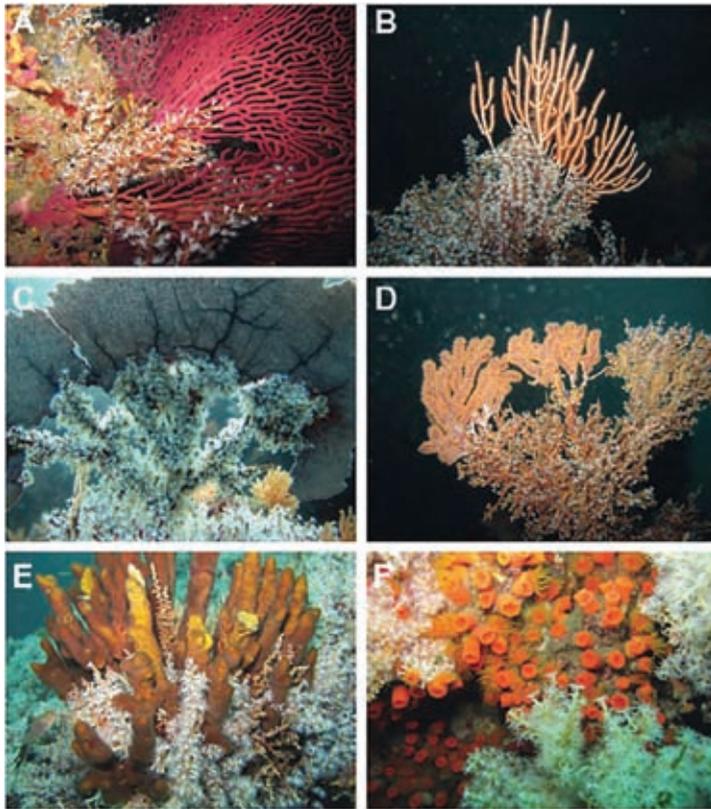
URL\_Manual de Monitoreo Submareal - Conservation International <https://www.conservation.org> > ecuador-documents. CC BY-NC-SA.

### Caso de estudio

*Octocorales del Pacífico colombiano afectados por C. riisei. 2014*

“El coral copo de nieve, *Carijoa riisei* (Octocorallia: Cnidaria), una especie nativa del Atlántico Occidental - Indo Pacífico ha sido objeto de monitoreo

por su comportamiento invasivo en el Pacífico desde hace unos cuarenta años y en la costa occidental de Colombia hace 15-20 años. Recientemente *C. riisei* se ha observado sobre creciendo octocorales nativos en varios litorales rocosos coralinos en el Pacífico Oriental Tropical-(POT) de Colombia. *C. riisei* ha habitado estos arrecifes durante al menos 15 años, pero este comportamiento agresivo frente a otros octocorales no se había notado hasta hace unos pocos años. Gracias al marcaje y foto monitoreo de varias colonias, se evaluó y observó mortalidad en toda la comunidad de



**Figura 6.** Crecimiento agresivo de *Carijoa riisei* en los octocorales endémicos y otros invertebrados del Pacífico Oriental Tropical, Cabo Corriente, Chocó (Colombia). A. *Pacifigorgia stenobrochis*, B. *Leptogorgia alba*, C. *Pacifigorgia irene*, D. *Muricea crassa*, E. *Aplysina chiriquiensis* (esponja), F. *Tubastrea coccinea* (coral escleractinio aposimbiótico). Imagen y leyenda tomada de: Sánchez, J.A. & Ballesteros, D. C. The invasive snowflake coral (*Carijoa riisei*) in the Tropical Eastern Pacific, Colombia. Rev. Biol. Trop. Vol. 62 suppl.1:199-207. San José, Febrero 2014, doi: [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442014000500014&lng=en](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442014000500014&lng=en). CC BY-NC

octocorales (incluyendo la extinción local de algunas especies de *Muricea*) y una constante competencia y cubrimiento de abanicos de mar *Pacifigorgia* y gorgonáceos *Leptogorgia* en el POT colombiano (Malpelo, Gorgona y Cabo Corrientes). *C. riisei* presentó una tasa lineal de crecimiento sobre otros octocorales de aproximadamente 1 cm m<sup>-1</sup>. El comportamiento agresivo de *C. riisei* en el POT merece más atención y programas regulares de monitoreo.”

El foto-monitoreo de las colonias ha permitido observar con certeza el crecimiento y expansión del *C. riisei* sobre las colonias nativas de octocoral, causando pérdidas de la biodiversidad del Pacífico colombiano (Fig. 6).

### Recomendaciones

El marcaje y foto monitoreo de *C. riisei* en conjunto con colonias de octocorales en el Frente Ecuatorial, ha demostrado ser una herramienta segura y fácil de aplicar del buceo científico. Es una técnica poco invasiva en el ecosistema que ayuda a la protección y conservación Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador, (SNAP). Además, es una metodología fácil de replicar para otro tipo de seguimiento de interacciones ecológicas y es recomendable ya que los costos de inversión para la construcción de cuadrantes y logística no requieren de un alto presupuesto. Por otra parte, nos brinda resultados sistematizados para poder comprobar a través del tiempo anomalías en el ecosistema ocasionadas por la variación de los factores ambientales en las costas del POT.

### Bibliografía

1. Abad, R. *et al.* Octocoral Distribution Patterns at the Equatorial Front (Tropical Eastern Pacific): *Muricea* and *Leptogorgia*. *Oceans* 3, 218-230 (2022).
2. Sánchez, J. A. *et al.* The invasive snowflake coral (*Carijoa riisei*) in the Tropical Eastern Pacific, Colombia. *Revista de Biología Tropical* 62, 199-207 (2014).
3. Quintanilla, E. *et al.* Taking a detour: invasion of an octocoral into the Tropical Eastern Pacific. *Biological Invasions* 19, 2583-2597 (2017).
4. Kahng, S. E. *et al.* Impact of an alien octocoral, *Carijoa riisei*, on black corals in Hawaii. *Coral Reefs* 24, 556-562 (2005).
5. Cárdenas-Calle, M. *et al.* First report of marine alien species in mainland Ecuador: threats of invasion in rocky shores. *Island invasives: scaling up to meet the challenge*, 452 (2019).
6. Cárdenas-Calle, M. *et al.* Invasion and current distribution of the octocoral *Carijoa riisei* (Duchassaing & Michelotti, 1860) in the Ecuadorian coast (Eastern Tropical Pacific). *Aquatic Invasions* 16 (2021).

7. Steiner, S. C. C. *et al.* Community structure of shallow water Alcyonacea (Anthozoa: Octocorallia) from the southern Tropical Eastern Pacific. *Ecological Research* 33, 457-469 (2018).
8. Perez, T. *et al.* Mortalité massive d'invertébrés marins: un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie* 323, 853-865 (2000).
9. Banks, S. *et al.* *Manual de Monitoreo Submareal*. Conservación Internacional Ecuador y Fundación Charles Darwin, Quito, Ecuador (2016).
10. Bustamante, R. *et al.* in *Reserva Marina de Galápagos: Línea Base de la Biodiversidad* (ed E. Edgar Danulat, G.J) Fundación Charles Darwin / Servicio Parque Nacional Galápagos, 38-67 (2002).
11. Cadena, N. J. *et al.* Colony growth in the harvested octocoral *Pseudopterogorgia acerosa* in a Caribbean coral reef. *Marine Ecology* 31, 566-573 (2010).

El buceo científico es una actividad que hace uso de las técnicas de buceo seguras en el trabajo subacuático para la búsqueda directa de información, montaje de experimentos, colecta de datos y muestras, entre otros. Los buzos científicos son científicos profesionales o en entrenamiento (estudiantes) que utilizan equipos y técnicas de buceo como herramienta para llevar a cabo su trabajo de campo. Los procedimientos de buceo científico avanzan constantemente, no solo por las nuevas ofertas tecnológicas, sino por la incursión de la actividad en la construcción de tejido social. Este manual es el producto de trabajo inter institucional de actores experimentados y reconocidos en el tema. Se incluyen las contribuciones de la comunidad científica de diversas instituciones y grupos a nivel costero o continental que practican el buceo científico como México, El Salvador, Costa Rica, Chile, Ecuador y Colombia. Se presenta el estado del arte de la disciplina para generar unas bases sólidas a fin de impulsar el buceo científico en Latinoamérica. Los aportes de este manual están divididos en dos partes: la primera parte se dedica a la gestión de la seguridad y la planeación en el buceo científico. La segunda parte es una muestra del estado del arte, que a su vez son historias de éxito de la actividad, en las técnicas y procedimientos para la investigación y avance en el conocimiento mediante toma de datos bajo el agua. Los métodos de adquisición de información bajo el agua presentados en 27 capítulos ofrecen una trazabilidad y rigurosidad para la toma de decisiones sobre el manejo de los ecosistemas marinos y costeros. Ante todo, queremos que el buceo científico sea una actividad segura y que se masifique en la educación superior en Latinoamérica. Consideramos que este manual es un primer paso hacia estas dos metas.



ISBN: 978-628-95506-9-6

