



OCEANA

PROYECTO ALACRANES

INFORME EJECUTIVO DE LA EXPEDICIÓN
CIENTÍFICA DE OCEANA 2023





PROYECTO ALACRANES

INFORME EJECUTIVO DE LA EXPEDICIÓN
CIENTÍFICA DE OCEANA 2023



Oceana es la mayor organización internacional dedicada exclusivamente a la conservación del océano. Oceana está reconstruyendo océanos abundantes y biodiversos al impulsar políticas basadas en la ciencia en países que controlan un tercio de la captura de peces silvestres del mundo. Con más de 275 victorias que han frenado la sobrepesca, la destrucción del hábitat, la contaminación y la matanza de especies amenazadas como tortugas y tiburones, las campañas de Oceana están dando resultados. Un océano restaurado significa que mil millones de personas pueden disfrutar de una comida saludable de pescados y mariscos, todos los días y para siempre. Juntos, podemos salvar los océanos y ayudar a alimentar al mundo.

Visite: www.oceana.org para obtener más información.

Forma de citar esta publicación:

Oceana. 2023. Proyecto Alacranes. Informe Ejecutivo de la Expedición Científica de Oceana 2023. México. 115pp.

DOI: 10.5281/zenodo.7987493



El presente documento incluye información e imágenes obtenidas como resultado del trabajo de campo, así como de los reportes de las y los siguientes investigadores que participaron en la Expedición Científica del Proyecto Alacranes en 2022:

M. en C. Gabriel Cervantes Campero, Kalambio, A.C.

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.

M. en C. Yoalli Quetzalli Hernández Díaz, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.

Dr. Alfonso Medellín Ortiz, investigador en Pesquerías.

M. en C. Antar Mijail Pérez Botello, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.

Dr. Adrián Munguía Vega, investigador en Genómica.

Dra. Ángela María Randazzo Eisemann, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.

Revisores

Dr. Miguel Rivas Soto, Director de Santuarios Marinos, Oceana

Dra. Mariana Reyna Fabián, científica de Océanos y Pesquerías, Oceana

Elaboración del documento

Dra. Ana Montiel Arteaga

Marzo 2023



ÍNDICE

Presentación	10
Datos destacados	14
1. Introducción	18
2. Área de estudio	22
3. Metodología	26
3.1. Diversidad y salud de los ecosistemas bentónicos del PNAA	30
3.2. Cambios entre los tipos de hábitats en el PNAA	48
3.3. Mapas 3D del sistema arrecifal PNAA	50
3.4. Escenarios de priorización del PNAA	54
3.5. ADN ambiental en el PNAA	60
4. Conclusiones y recomendaciones	66
5. Referencias	70
6. Tripulación en la Expedición Científica	76
7. Agradecimientos	78
8. Anexos	81

Presentación



México es un país oceánico, alrededor del 65 % de su territorio es marítimo y además tiene la fortuna y responsabilidad de ser uno de los 17 países megadiversos del mundo por la gran cantidad de especies que posee. Con 187 Áreas Naturales Protegidas, 37 de ellas con territorio marítimo y 68 con territorio costero, México es líder en la conservación de sus aguas territoriales, con el 22.3 % de sus mares bajo una categoría de protección. Sin embargo, decretar un Área Natural Protegida no se traduce inmediatamente en un mejor bienestar para las especies que habitan estos territorios o en una conservación eficiente en sí misma.

Con más de cien años de historia en la conservación, México tiene Áreas Naturales Protegidas emblemáticas como el Parque Nacional Revillagigedo —la mayor área de exclusión pesquera de América del Norte—, Cabo Pulmo —caracterizado por el trabajo comunitario, que es un ejemplo de inclusión—, el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano —donde pese a la actividad portuaria y petrolera en la zona aún se conservan emblemáticos arrecifes del Golfo de México—, solo por nombrar algunas.

Sin embargo, estos esfuerzos de conservación enfrentan cada vez más desafíos tanto a nivel local como a nivel global. Los cambios producidos en el clima durante los últimos años, a raíz de la crisis climática global, resultado de un exceso de emisiones de gases de efecto invernadero, provocan el aumento en la temperatura, los cambios en las corrientes oceánicas y la acidificación de las aguas oceánicas, traen consigo migraciones de especies, especies in-

vasoras que colonizan rápidamente nuevos espacios, blanqueamiento y enfermedades coralinas y otros inconmensurables problemas. Si a esto le sumamos la escasez de recursos para la pesca por la sobreexplotación, las actividades de pesca ilegal y una actividad turística local que no contempla una convivencia armónica con la naturaleza, el panorama no es alentador y demanda acciones concretas y efectivas para continuar la tradición y liderazgo de México en materia de conservación.

La conservación es mucho más que dibujar polígonos en el mapa o destinar áreas de exclusión de las comunidades que históricamente han aprovechado ciertos sitios. Se trata de adaptarnos a estos nuevos desafíos y actualizar programas de manejo, monitorear y conservar hábitats marinos críticos como corales, pastos marinos o bosques de algas; identificar fuentes de contaminación y ponerles un alto a través de programas efectivos de monitoreo sobre la calidad de las aguas, entre otras medidas.

En Oceana sabemos que el desafío de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) es enorme, y más aún cuando no se cuenta con los recursos humanos, de infraestructura y económicos para empujar soluciones innovadoras y eficaces. Es por eso que hemos querido aportar con nuestro grano de arena a esta titánica tarea, visitando la mayor Área Natural Protegida del sur del Golfo de México: el Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA), que desde 1994 busca proteger una zona biológica de suma importancia para México, una transición entre el Golfo de México y el Caribe mexicano.

En el presente documento se presentan cinco investigaciones que se realizaron a bordo del Caribbean Kraken durante mayo de 2022 junto a investigadores e investigadoras de primer nivel, líderes en sus respectivos campos, para poder eva-

luar y conocer la salud del arrecife, cuantificar el estado de las poblaciones de peces y evidenciar problemáticas que presentan los arrecifes en la actualidad. Estamos seguros de que este informe es un aporte para la CONANP que ayudará a actualizar el Programa de Manejo del PNAA y tomar decisiones para fortalecer los programas y acciones dentro del Parque Nacional.

Mediante el presente documento invitamos al lector a maravillarse con el arrecife más grande del sur del Golfo de México, a identificar puntos de acción en los cuales se puede mejorar la conservación de esta emblemática Área Natural Protegida en la Península de Yucatán, y hacemos el llamado a la autoridad a actualizar los mecanismos de conservación acorde con los desafíos que los nuevos tiempos ponen sobre la mesa para seguir conservando la riqueza de México y con ello favorecer a las comunidades que se benefician directa e indirectamente de los recursos naturales del país.

Desde Oceana, la mayor organización a nivel mundial dedicada exclusivamente a la protección de los océanos, queremos ser parte de los cambios que traerán consigo océanos sanos y abundantes, así como comunidades que en armonía con la naturaleza puedan llevar a la mesa de los mexicanos y mexicanas una proteína de calidad, rica en nutrientes y con bajo impacto ambiental y climático.

Dr. Miguel Rivas Soto

Director de Santuarios Marinos de Oceana en México



Datos destacados

El presente documento es resultado de los esfuerzos que Oceana realiza en México, junto con un equipo de científicos especializados, particularmente en Arrecife Alacranes, un Área Natural Protegida con poco menos de 300 km cuadrados, que resguarda más de 950 especies marinas. Además, se incluyen sugerencias y recomendaciones con el propósito de contribuir a la conservación de los santuarios marinos de México.

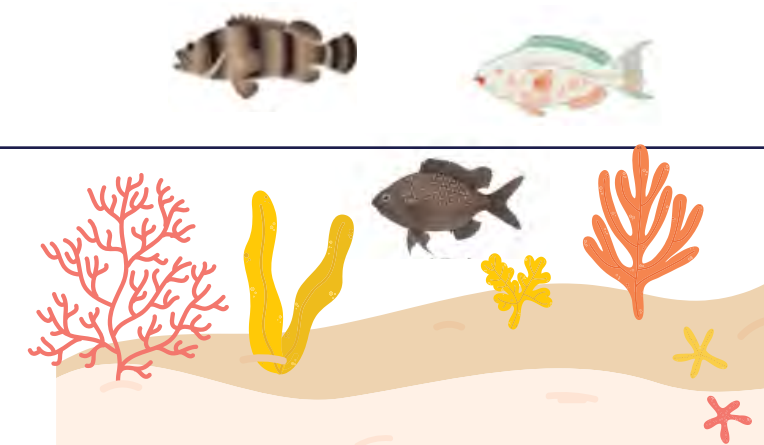
Durante la expedición científica se utilizaron técnicas novedosas para el estudio de la vida en los océanos, como es el análisis por ADN ambiental, para conocer la biodiversidad marina a través de la información genética, fotogrametría para la generación de mapas 3D, y censos con videograbaciones para tener conteo e identificación de la mayor parte de los organismos del fondo del arrecife y de los peces en el Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA). Es importante señalar que todas las investigaciones fueron realizadas por científicos expertos en la vida submarina.



Se registraron un total de **33 especies de corales** formadores de arrecifes, mediante censos visuales directos, videos y fotogrametría, siendo nueve especies las que representan el **90 % de la abundancia de los corales observados**.

El PNAA es el arrecife más importante al sur del Golfo de México por sus características ecológicas y los bienes y servicios que brinda. En la presente evaluación de la salud de sus arrecifes, los resultados muestran de forma general un sistema arrecifal con un estado de salud regular, con algunos indicadores alentadores como los sitios con abundancia de corales y presencia de especies constructoras de arrecifes coralinos, además de una diversidad y abundancia de peces comerciales y especies clave que promueven el bienestar de los corales. Cabe señalar que la zona núcleo norte presentó un mayor porcentaje de sitios con buena y muy buena calificación, además de un porcentaje menor de sitios con mala calificación.

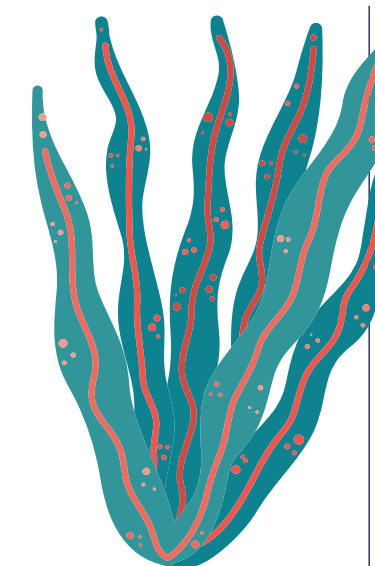
Con el muestreo de observación directa, se registró un total de 116 especies de peces, de las cuales 19 de ellas representaron el 90 % de la abundancia. Mientras que con el muestreo por video-transectos se registraron 58 especies. Entre ambas metodologías se logró el registro de 125 especies de peces dentro del PNAA, lo que representa más de la mitad de las especies registradas en su Programa de Manejo.



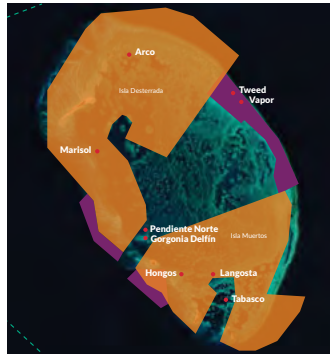
La mayoría de los sitios visitados presentó una gran diversidad y abundancia de peces, incluidas algunas especies importantes en el mantenimiento de los arrecifes de coral, también conocidas como especies clave, entre las que destacan los peces loro y peces cirujanos, que por su forma de alimentación promueven espacios donde los corales pueden establecerse.

Se encontró que los sitios con corales en buen estado y con estructuras más complejas promueven mayor diversidad y abundancia de peces en el PNAA, como el sitio Tweed, que se encuentra en la zona de amortiguamiento y la zona núcleo norte.

Los resultados señalan que, en dos décadas, **casi el 60 % del arrecife ha sufrido cambios negativos, asociados a la pérdida de cobertura coralina y al aumento en macroalgas**. Una tercera parte del Arrecife Alacranes está asociada con sitios principalmente de arena y sin corales, donde no se han detectado cambios, mientras que en cerca del **9 % del arrecife se observaron cambios positivos**, principalmente asociados a la disminución de macroalgas sobre los corales duros, lo que permite la recuperación de los corales.



Por otro lado, con la investigación ADN ambiental se encontró un total de mil 831 especies de eucariotas en Arrecife Alacranes. El porcentaje de especies para peces y tiburones fue del 11 %, de algas el 27, y 62 % de otros animales multicelulares, algunos de los cuales no se logró determinar su especie, lo que significa que aún hay más especies por conocer que no se han registrado con los métodos de monitoreo convencionales.



Los sitios con mayor número de especies encontradas con ADN ambiental en Arrecife Alacranes están en la zona núcleo norte y al noreste del área protegida en los sitios Tweed y El Arco que presentaron la mayor riqueza de especies detectadas con técnicas genéticas, incluyendo el grupo de eucariotas y peces.

Es importante señalar que en el sitio llamado Tweed se registró la mayor diversidad marina con el método de ADN ambiental; sin embargo, esta área aún no se encuentra incluida en la zona núcleo del PNAA, lo que presenta una oportunidad para incluir este sitio dentro de la zona núcleo en un futuro cercano.



Dentro de las amenazas que se observaron dentro del PNAA fue la presencia del pez león (*Pterois volitans*), tanto en censos visuales directos como en ADN ambiental. Esta especie

representa una amenaza, al ser una especie invasora del Indo-Pacífico que no tiene depredadores naturales en los sitios donde es introducido, y desplaza las especies originarias del lugar, por lo tanto, es prioritario fortalecer las medidas de control para evitar que cause cambios negativos en los ecosistemas del Arrecife Alacranes.

Con base en los datos científicos de la expedición de Oceana en el PNAA, se necesita actualizar el Programa de Manejo, incluyendo los límites de los polígonos de las zonas núcleos en conjunto con las instituciones y actores clave, para incluir a las áreas identificadas de alta importancia ecológica y que proveen de recursos económicos a la región, que además reflejen las condiciones actuales de calidad del hábitat y su uso. Es decir, la actualización de los polígonos de la zona núcleo contribuirán a minimizar la exposición de estos sitios a los usos de extracción de recursos naturales que se realiza en la zona de amortiguamiento en donde se encuentran clasificados actualmente.

Se realizó un ejercicio de consulta participativa con actores clave para la conservación del PNAA, dando como resultado la propuesta de tres escenarios de priorización para el área protegida: el primero de ellos prioriza el ambiente, es decir, la importancia biológica; el segundo escenario prioriza el ambiente y los usos poco intensos identificados dentro del PNAA; finalmente, el tercer escenario prioriza el ambiente y los usos más intensos dentro del PNAA. Los tres mapas de priorización permiten visualizar la información relevante que permitirá a las autoridades, instituciones y actores clave decidir acciones para la conservación de la diversidad de Arrecife Alacranes.



En general, tanto los censos visuales como los resultados con ADN ambiental señalan los sitios más conservados en la zona núcleo norte y en algunos sitios de la zona de amortiguamiento, como Tweed, por lo que se propone incluir en la zona núcleo las estructuras de Prioridad Alta al sureste de Isla Desterrada, las zonas del arrecife posterior, cresta arrecifal y frente arrecifal a sotavento de la plataforma arrecifal, y los parches coralinos reticulados en la porción central de la plataforma arrecifal.



1. Introducción

Los océanos dominan el planeta. Los ecosistemas marinos sostienen la mayor parte de la biomasa a nivel mundial y mantienen alrededor de una cuarta parte de la biodiversidad de la Tierra [1]. Uno de los ecosistemas marinos más diversos y productivos son los arrecifes de coral, que se encuentran en menos del 1 % de los océanos [2].

Los arrecifes de coral tienen gran valor por todos los beneficios que brindan a otros organismos, incluyendo la humanidad. En 2018, año internacional de los arrecifes de coral, Naciones Unidas estimó que el valor de los recursos que provienen de los ecosistemas de arrecifes de coral es de 375 mil millones de dólares al año. Por la protección que dan a las costas, el atractivo turístico que mantienen y los recursos pesqueros que sostienen, se ha estimado el valor promedio de una hectárea de arrecife de coral en 130 mil dólares al año, llegando hasta 1.25 millones en lugares donde el turismo es mayor. Por ejemplo, en el Caribe, los arrecifes coralinos representan un tercio del Producto Interno Bruto (PIB) mientras que en lugares como las Maldivas llega hasta un 80 % [3].

La importancia ecológica de los arrecifes coralinos se debe a que son sitios de refugio y reproducción de una gran cantidad de especies marinas, incluyendo algunas de interés comercial. Poseen un gran valor por sí mismos al tener sus formas y procesos únicos, así como su propia

composición y diversidad de organismos que caracteriza a cada uno. Además, son barreras naturales que protegen a las costas de la erosión por efecto del oleaje y contra los eventos naturales como tormentas y huracanes. Muchos ecosistemas costeros, como manglares y pastos marinos, existen gracias a la presencia de los arrecifes de coral, así como numerosos poblados, asentamientos humanos y edificaciones de las costas que se benefician de estos arrecifes.

Entre otros beneficios, las especies presentes en los arrecifes coralinos son fuente de sustancias biológicamente importantes [4]. Estas sustancias se emplean como fármacos a partir de sus propiedades antibióticas, antivirales, anticancerígenas, hipotensoras, antiinflamatorias, antiasmáticas, antiherpéticas, antiartríticas, etcétera. [5], por lo que benefician la salud humana, siendo de importancia para la ciencia.

La gran diversidad de fauna y flora de los arrecifes coralinos genera un paisaje submarino de extraordinario valor estético, el cual resulta de gran trascendencia social y económica para los países tropicales [4]. Esto los convierte en lugares con alta demanda turística internacional, por lo tanto, resulta un recurso natural que aporta a la economía, siempre que se maneje correctamente. Por ejemplo, en los arrecifes coralinos mexicanos se ha estimado un ingreso relacionado con el turismo y los arrecifes por alrededor de mil 700 millones de dólares por año [6].

Los arrecifes de coral también sostienen una gran variedad de recursos pesqueros, entre ellos la langosta y peces como los pargos y los meros. Se estima que los arrecifes coralinos aportan alrededor del 11 % de las pesquerías totales de los países tropicales. Además, aproximadamente 200 especies comerciales provienen de los arrecifes de la región del Gran Caribe [7].

En México existen varios arrecifes de coral de gran valor. En el Golfo de México, uno de los más importantes es el Arrecife Alacranes, un Área Natural Protegida (ANP) decretada en 1994, y recategorizada como Parque Nacional en el 2000 [8]. Para 2006, el ANP fue incluida en la Red Mundial de Reservas de la Biosfera del Programa sobre el Hombre y La Biosfera (MAB) de la UNESCO y en 2008

integrado a la lista de sitios Ramsar [9], estos reconocimientos han sido por su importancia para la conservación de especies endémicas y en peligro de extinción, tanto de ambientes marinos como terrestres (húmedales). Su manejo y monitoreo está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). El Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) es el arrecife más grande del sur del Golfo de México. En él habitan numerosas especies de corales así como vertebrados e invertebrados, convirtiéndolo en una gran reserva de organismos marinos que nutren otros sistemas arrecifales cercanos. La presencia de toda esta biodiversidad permite que los ecosistemas de la región tengan mayor capacidad de regenerarse, de ahí la importancia de su protección.

Además, Arrecife Alacranes representa un importante ingreso para el sostén de cuatro mil 360 familias dedicadas a la pesca de especies comerciales, principalmente mero, huachinango, langosta y pulpo, al ser un sitio clave para la reproducción de estas especies, adicionalmente, cuenta con una gran riqueza paisajística que promueve las actividades turísticas y recreativas en la zona. Sin embargo, se ha identificado un deterioro de este arrecife a lo largo de los años, tanto por presiones globales —entre ellas el cambio climático— como por presiones locales —por ejemplo la pesca ilegal y el turismo que requiere de una mayor regulación.

Debido a la importancia que tiene el PNAA, Oceana en México organizó su primera expedición científica con el Proyecto Alacranes, misma que inició a mediados del 2021 con el objetivo de conocer el estado actual de Arrecife Alacranes y registrar los sitios mejor conservados, la biodiversidad que resguardan y las amenazas para su conservación. Este documento es el resultado de la segunda fase de la expedición científica realizada en 2022, enfocando los esfuerzos en el monitoreo de la diversidad y estado de conservación. La información que proporciona es una valiosa herramienta para la toma de decisiones en acciones de conservación y restauración de su biodiversidad, además de permitir la mejora económica para las familias que sobreviven de la pesca de especies comerciales aledañas a los arrecifes, al dar la posibilidad de cuidar los sitios de reproducción de las especies de interés comercial y de las especies importantes para la creación y recuperación de los arrecifes de coral.



2. Área de estudio

El Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) se localiza en el Banco de Campeche, a 140 km de Puerto Progreso, Yucatán, abarcando un área de 333 mil 768 hectáreas. En el PNAA existen cinco islas: Pájaros, Chica, Pérez, Muertos y Desterrada, que son sitios importantes de anidación y descanso para 116 especies de aves, además de que sirven como refugio de embarcaciones cuando hay mal tiempo. En el área se han encontrado cuatro especies de tortugas marinas consideradas en peligro de extinción (carey, laúd, caguama y blanca), mamíferos marinos como la ballena piloto, varias especies de delfines, 136 de peces óseos y 24 especies de tiburones, 34 de corales, entre otras especies que forman parte de este ecosistema tan especial y único [10]. Un estudio reciente reportó más de mil 600 especies incluyendo el grupo de aves, reptiles, peces, corales y otros invertebrados [11]. Además es un sitio de reproducción para numerosas especies, incluyendo algunas de interés comercial como la langosta, lo que sostiene actividades como la pesca y el turismo que representan ingresos para las familias de la zona [7].

Esta Área Natural Protegida se administra por medio de un Programa de Manejo (publicado en 2006), documento que informa el nombre y localización de las distintas zonas del PNAA, detallando las dos zonas núcleo, ubicadas al norte y al sur del sistema arrecifal, cubriendo un total de 31 mil 670 hectáreas, y una zona de amortiguamiento, con una

superficie de 302 mil 98 hectáreas, englobando el límite del parque y dos subzonas [10] (Figura 1). En las zonas núcleo sur y norte se encuentran representados los ecosistemas terrestres y marinos con alta biodiversidad, con poca o sin alteraciones, que mantienen estables las poblaciones de plantas y animales silvestres, donde se permiten las actividades de investigación, monitoreo, educación ambiental, buceo recreativo y otras actividades que no alteren los ecosistemas, por lo que está prohibida pesca comercial incluyendo la pesca

recreativa. Mientras que la zona de amortiguamiento incluye dos subzonas con áreas conservadas y con algún grado de modificación humana, donde se autoriza realizar actividades de aprovechamiento sustentable que permita la conservación de los ecosistemas. Cuando se delimitaron estas zonas de manejo se contemplaron las actividades que se pueden o no realizar dentro de cada una, considerando que en las zonas núcleo del PNAA están presentes los principales ambientes terrestres y marinos en buen estado de conservación.

Área aumentada

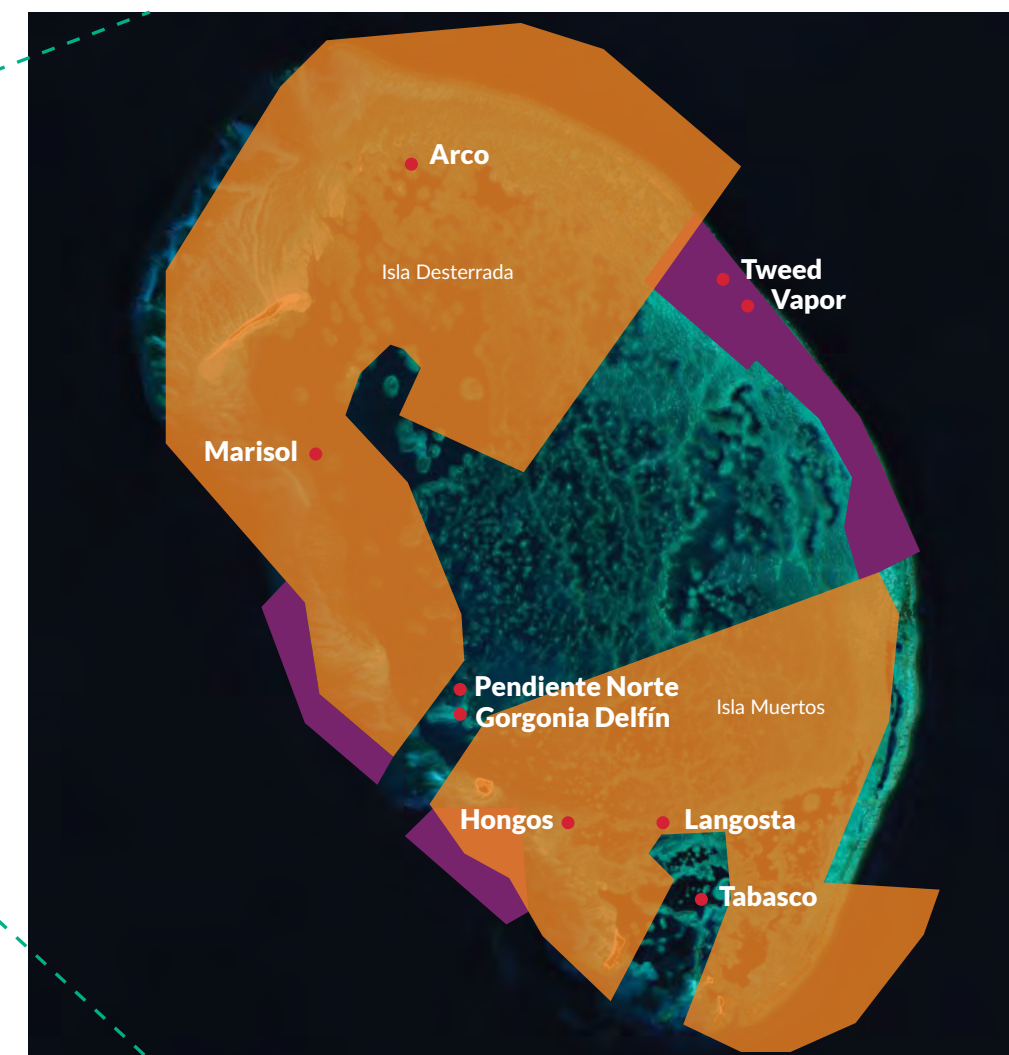
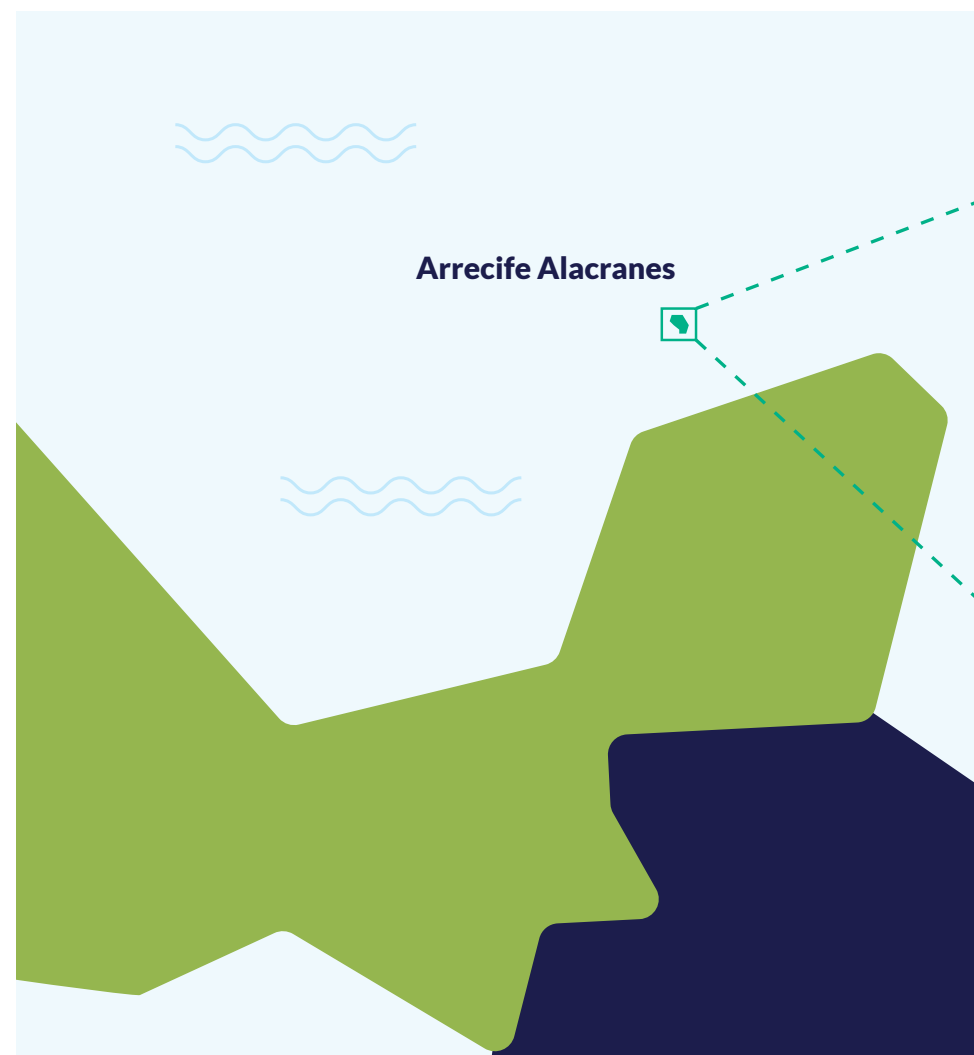


Figura 1. Mapa del Parque Nacional Arrecife Alacranes con la zonificación actual. En naranja las zonas núcleo Sur y Norte, y en morado la zona de amortiguamiento. Se incluyen los nombres de los sitios de referencia para algunos de los muestreos de la expedición científica en 2022.

3. Metodologías y Resultados del PNAA

Oceana tiene la misión de proteger los océanos del mundo. Como parte de las acciones para alcanzar su misión, se realizó la primera expedición científica en 2021, visitando los arrecifes de Alacranes y Bajos del Norte [7]. El 19 mayo de 2022 se llevó a cabo la segunda fase de la expedición científica en Arrecife Alacranes. En Puerto Progreso zarpó una embarcación liderada por el equipo de Oceana —un grupo de siete investigadoras e investigadores— para conocer la situación actual del ecosistema arrecifal en el PNAA, y registraron información de los arrecifes de coral, fondo marino, peces y ADN(1) ambiental. Los sitios visitados para los monitoreos fueron seleccionados para obtener datos de los diferentes ecosistemas del sistema arrecifal, cubriendo las zonas núcleo norte y sur, así como zonas de amortiguamiento del PNAA (Figura 2).

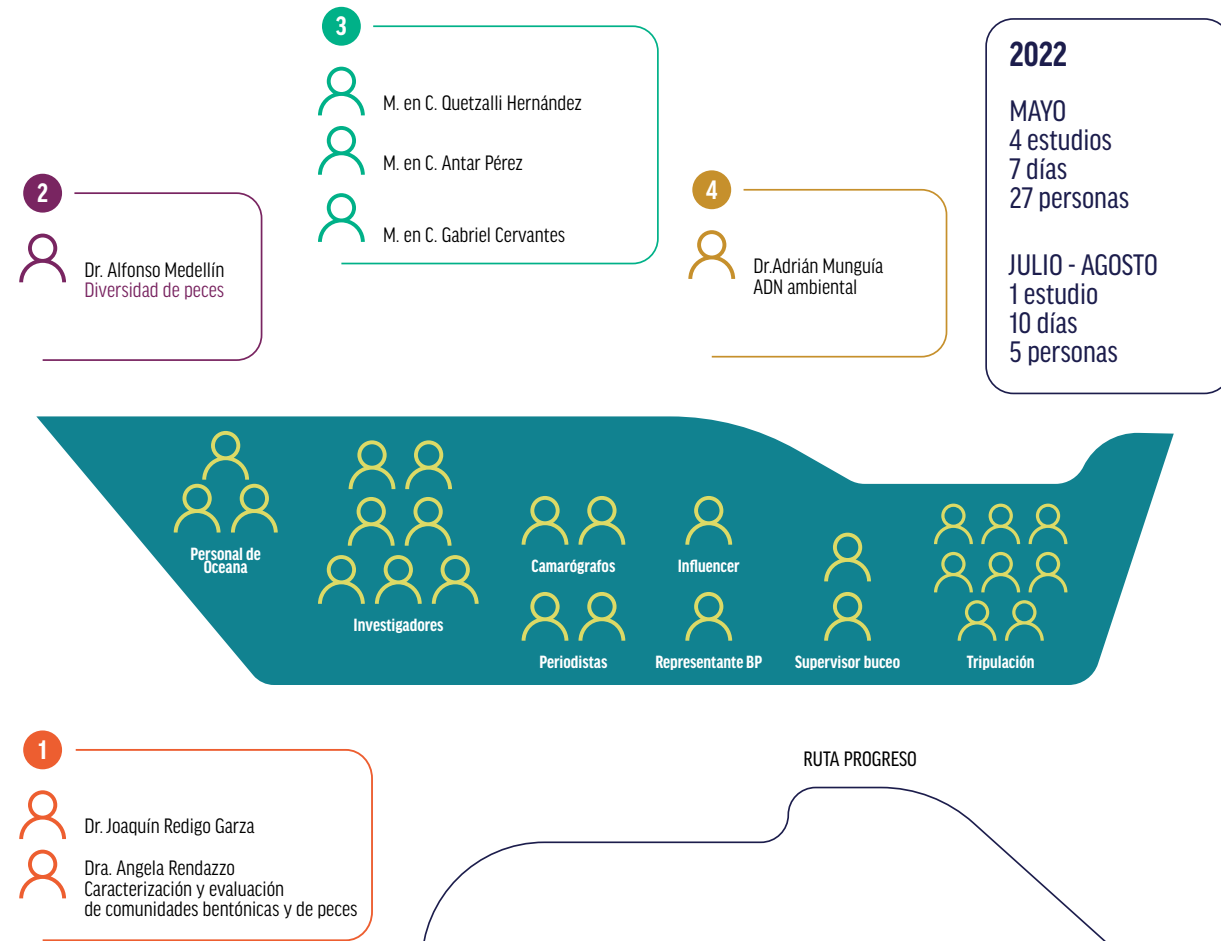


Figura 2. Diagrama de la expedición científica en el PNAA en 2022. Muestra las investigaciones realizadas y las personas involucradas.

Los monitoreos se realizaron del 20 al 24 de mayo en ocho sitios con equipo de buceo (Scuba) y cuatro más con equipo especial para tomar muestras de ADN ambiental en sitios de gran profundidad. Adicionalmente, para la investigación de condición del arrecife se continuaron los monitoreos en julio y agosto abarcando así un total de 111 sitios con monitoreo Scuba (Figura 3; Anexo 1). Por una parte, con la metodología de video-transectos, se obtuvo información de los corales duros o escleractinios (formadores de arrecifes), algas, esponjas y peces entre otros

grupos. Se registró la diversidad, cobertura y condición actual de los corales duros, así como la presencia de enfermedades, blanqueamiento y porcentaje de corales muertos (Figura 4). Por otro lado, con los censos *in situ* se identificaron peces y corales. Además, se utilizó la fotogrametría para el estudio del fondo marino a escala más detallada, principalmente los corales duros, y para el conocimiento del ADN ambiental se emplearon herramientas moleculares. Utilizando la información de los monitoreos del fondo marino, corales y peces, se construyeron mapas temáticos para la propuesta de escenarios de priorización para la conservación del ANP. A continuación, los detalles de cada investigación.

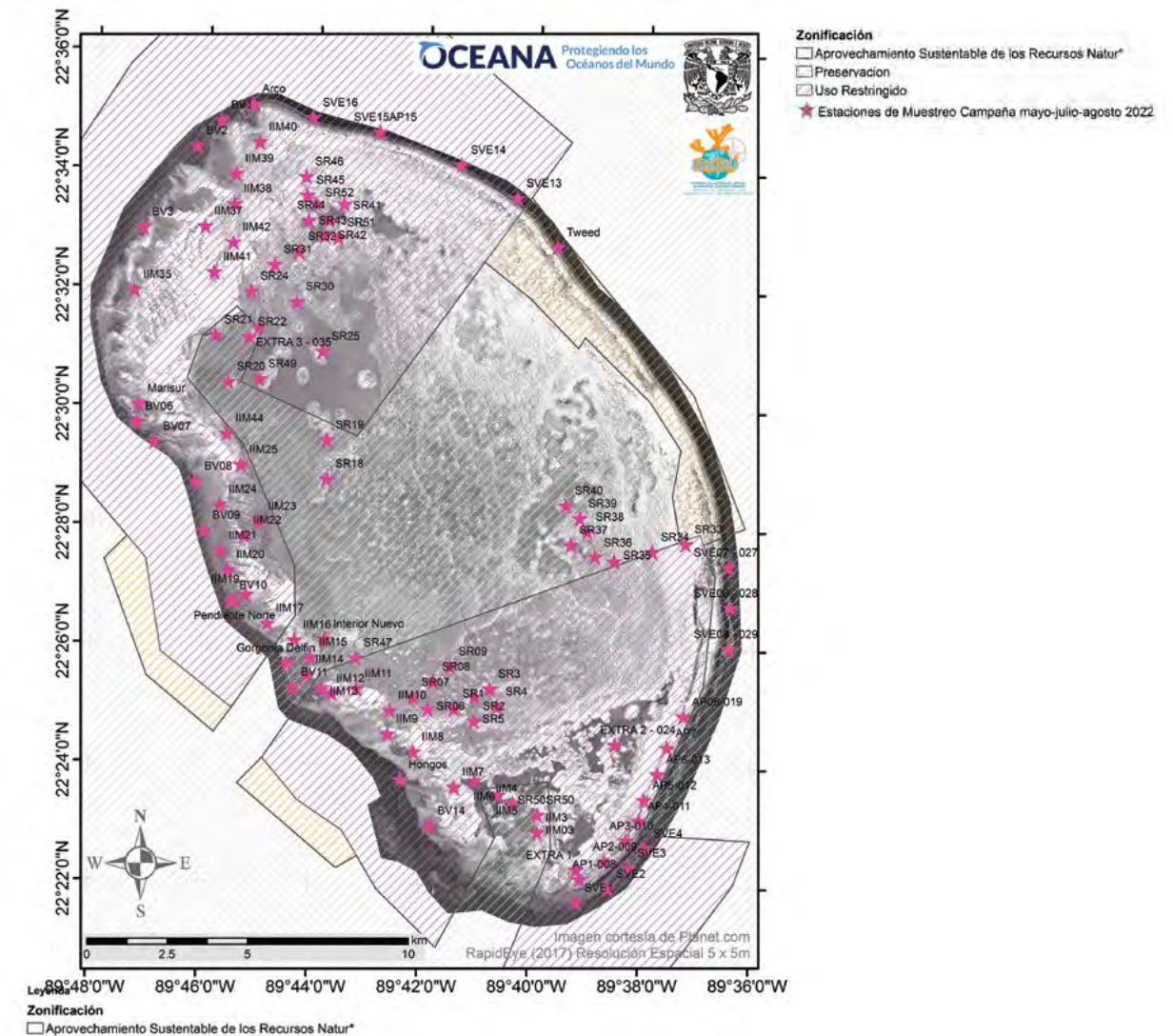


Figura 3. Mapa del PNAA con los sitios de muestreo con equipo Scuba visitados durante mayo, julio y agosto de 2022. En sombra rosa se marcan las zonas núcleo sur y norte; en sombra gris, la zona de amortiguamiento; en anaranjado, las zonas de preservación; las estrellas indican los puntos de monitoreo con la clave de identificación.

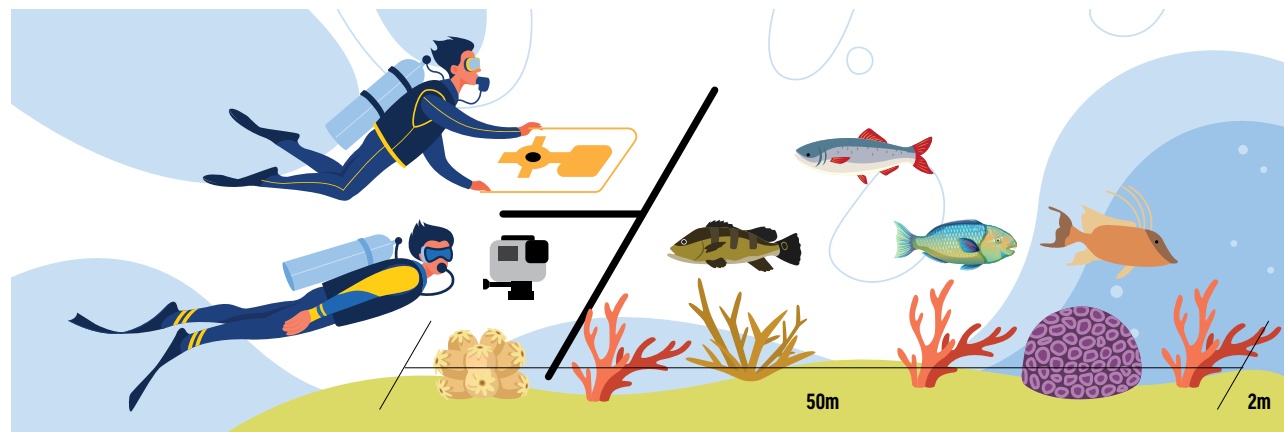


Figura 4. Metodología con equipo Scuba, por transectos con videograbación y censos directos del fondo marino, corales duros, peces y otros organismos bentónicos.

3.1. Diversidad y salud de los ecosistemas bentónicos del PNAA

Para conocer la salud de los ecosistemas del fondo marino del PNAA es necesario evaluar distintos indicadores, es decir, los elementos que nos dan pauta para saber si las condiciones de los ecosistemas son normales para su permanencia a largo plazo e identificar si existe alguna amenaza para su sobrevivencia. Uno

de los elementos importantes a considerar es el fondo marino, donde se arraiga la vida de los ecosistemas; otro elemento clave incluye al grupo de organismos que habitan en el fondo del mar, conocidos como organismos bentónicos o bentos: corales, esponjas, anémonas, estrellas de mar, cangrejos, moluscos, entre otros. También los peces se asocian al estado de salud de los arrecifes coralinos en donde encuentran su fuente de alimentación, sitios de reproducción y refugio para sobrevivir.

HÁBITATS O FONDOS MARINOS

Para comprender el ensamblaje de las especies marinas del PNAA es importante conocer el fondo marino, es decir, con los resultados de la expedición científica se logró identificar y clasificar nueve fondos marinos (Figura 5), cada uno determinado por las características y organismos presentes, los cuales se presentan a continuación:

1 Pastos marinos densos (PMD). Los pastos marinos son plantas acuáticas capaces de resistir altos niveles de salinidad, viven en zonas poco profundas y con poco oleaje, llegando a formar extensas praderas. Son fondos marinos muy importantes al ser utilizados por muchas especies como área de alimentación y crecimiento. En Arrecife Alacranes se han identificado tres géneros: *Thalassia*, *Syringodium* y *Halodule* [10], que son utilizados por poblaciones de varios invertebrados como moluscos (caracol, pepino de mar), equinodermos (erizos y estrellas de mar), así como peces (principalmente herbívoros).

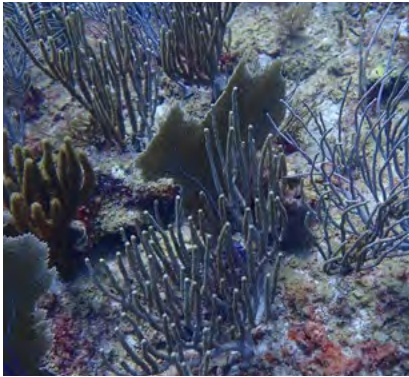


2 Parches de coral en pastos marinos (PCP). Este tipo de fondo es muy similar al de los Pastos Marinos Densos, aunque está situado en zonas un poco más profundas, con pastos menos abundantes. La principal diferencia es que aquí los pastos se combinan con formaciones coralinas que también tienen el papel de generar refugio para muchas especies de peces e invertebrados.

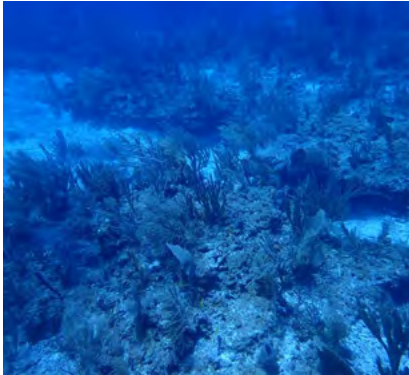


3 Estructuras dominadas por macroalgas o algas carnosas (EBM). Los arrecifes coralinos son construcciones formadas por la acumulación de esqueletos de corales duros compuestos por carbonato de calcio. En este tipo de fondo abundan los esqueletos de corales que han muerto por algún factor de estrés, y que con el tiempo han sido recubiertos por algas pardas, principalmente de los géneros *Dictyota* y *Lobophora*.





4 Arrecife dominado por corales blandos u octocorales (AFO). Este tipo de fondo, generalmente plano y profundo se caracteriza por estar expuesto a las olas, corrientes y marejadas intensas. En estos fondos se desarrollan extensos jardines de abanicos de mar y otros tipos de corales blandos, los cuales son más resistentes al oleaje que otras especies de coral duro. Son importantes jardines marinos que brindan refugio a muchas especies de peces.



5 Arrecife con macroalgas y poca cobertura de coral duro (AFM). Este tipo de fondo está caracterizado por tener pocos corales duros, de manera dispersa, y muchas algas pardas, también de los géneros *Dictyota* y *Lobophora*. Este tipo de fondo no ofrece mucho refugio para peces u otros organismos, porque la altura de las pocas estructuras coralinas es baja.



6 Planicies de arena con algas y poca cobertura de corales duros (PAA). En este tipo de fondo se acumula la arena producida en el arrecife por la ruptura de los esqueletos de los corales, conchas y caracoles, la acumulación de esqueletos de pequeños organismos y la disolución de otros organismos como las algas verdes del género *Halimeda*. Sobre estas camas de arena crecen algunas algas y a veces se pueden encontrar corales pequeños.

7 Estructuras con corales duros dominada por cianobacterias y algas (ECC). Este tipo de fondo es similar al fondo número 3 (EBM), excepto que el tipo de algas que predominan son mucho más variadas, incluyendo algas pardas, verdes, rojas y pequeñas bolitas de color oscuro, hechas de acumulaciones de bacterias.



8 Estructuras de corales duros en buen estado (ECB). Este tipo de fondo es el más importante del arrecife, ya que aquí predominan los corales duros en buena condición, hay pocas algas, y la función de refugio para muchas especies de peces e invertebrados está mejor preservada.



9 Estructuras de corales dominadas por algas césped y sedimento (ECT). Estas estructuras también son similares al fondo tipo 3 (EBM) pero en vez de que las estructuras de los esqueletos de coral estén cubiertas por algas pardas, se encuentran cubiertas por delgadas capas de pequeñas algas verdes y arena muy fina.



Imágenes de los tipos de fondos marinos identificados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes en la expedición científica en 2022. 1) Pastos marinos densos (PMD); 2) Parches de coral en pastos marinos (PCP); 3) Estructuras dominadas por macroalgas o algas carnosas (EBM); 4) Arrecife dominado por corales blandos u octocorales (AFO); 5) Arrecife con macroalgas y poca cobertura de coral duro (AFM); 6) Planicies de arena con algas y poca cobertura de corales duros (PAA); 7) Estructuras con corales duros dominada por cianobacterias y algas (ECC); 8) Estructuras de corales duros en buen estado (ECB), y 9) Estructuras de corales dominadas por algas césped y sedimento (ECT). Fotografía: Ángela Randazzo.



A partir de identificar los fondos marinos en el PNAA, se encontró que los hábitats con mayor importancia ecológica cubren alrededor del 12 %, es decir, las estructuras de coral duro en buen estado, estructuras de coral duro con algas césped-sedimento y pastos marinos; mientras que los hábitats de importancia ecológica media abarcan el 31 %, que incluye los fondos de coberturas mixtas de coral duro, corales blandos y macroalgas. Esto deja el 57 % restante a los hábitats de baja importancia ecológica que se encuentran en más de la mitad del fondo marino de Arrecife Alacranes, compuestos principalmente por cascajo con poca cobertura de coral y fondos de arena (Figura 6).

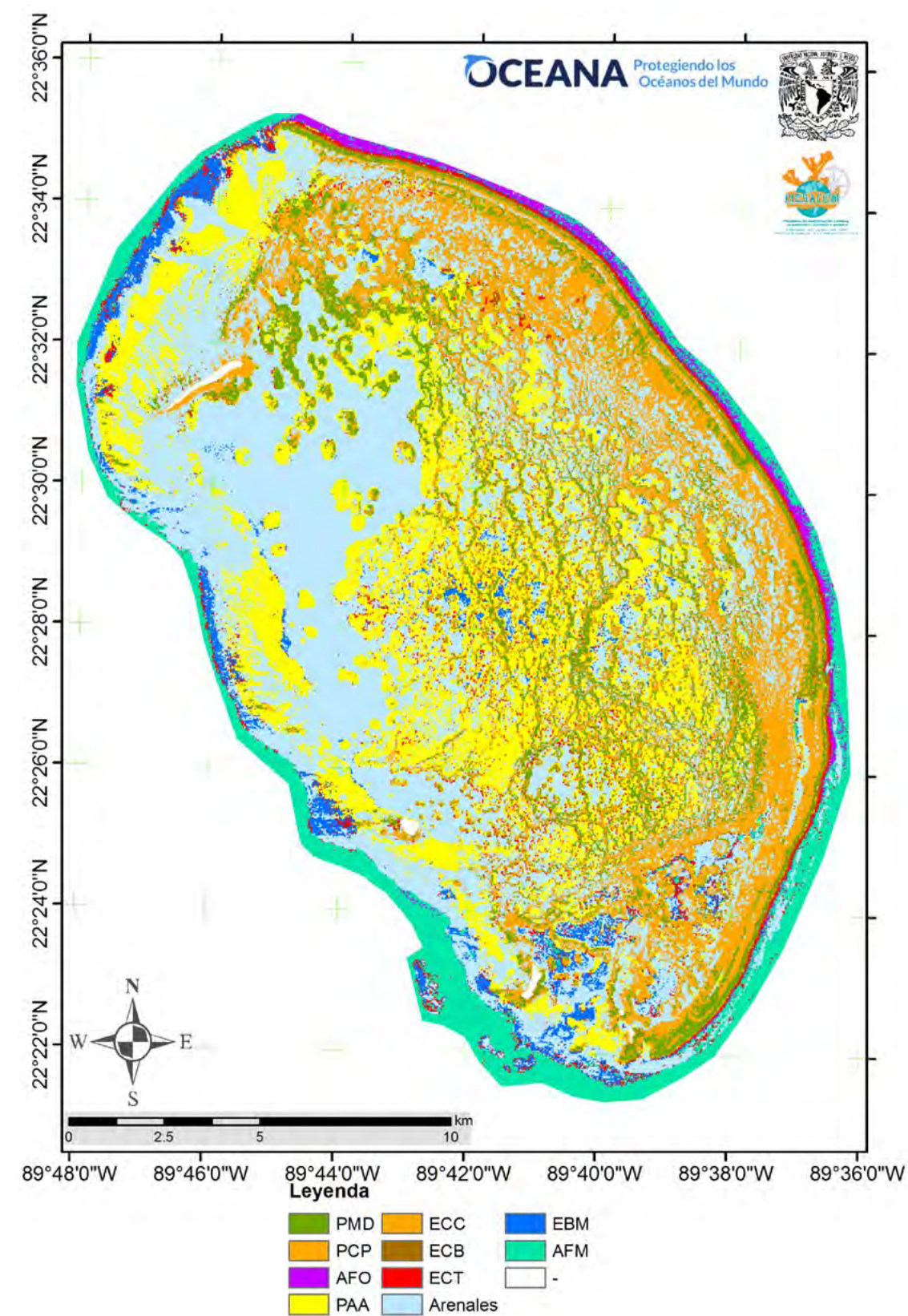


Figura 6. Mapa actualizado con los nueve tipos de hábitat en el fondo arrecifal registrados en el PNAA para el año 2022.

Siguiendo el protocolo AGRRA, Programa de Evaluación Rápida de Arrecifes del Atlántico y Golfo (por sus siglas en inglés), se pueden evaluar las características importantes, tanto estructurales como funcionales de los arrecifes coralinos [12], por ello, una vez que fueron identificados los fondos marinos, se agruparon en tres categorías de acuerdo con los componentes de los hábitats marinos [13]:

- ➔ **Positivos:** aquellos que pueden formar estructuras, como los corales duros.
- ➔ **Neutros:** aquellos como las esponjas no invasivas, corales blandos y sustrato.
- ➔ **Negativos:** aquellos invertebrados competidores, macroalgas, algas césped y cianobacterias.

Es decir, los componentes positivos promueven el crecimiento y conservación del arrecife, en contraste con los negativos que son amenazas para su recuperación y preservación, mientras los neutros no se han asociado a ningún beneficio, pero tampoco a su deterioro. Se encontró que los sitios dominados por estructuras de coral duro en buen estado son los que tienen mayor porcentaje de componentes bentónicos positivos, mientras los hábitats con parches de coral en pastos marinos, pastos marinos densos y planicies de arena con algas y poca cobertura de corales estuvieron dominados por los componentes neutros. En contraste, los hábitats de corales duros dominados por algas, macroalgas, cianobacterias, así como por algas césped y sedimento tuvieron en su mayoría los componentes negativos, es decir, fueron los sitios donde la cobertura del arrecife coralino se observó en disminución.

CORALES DUROS

Como parte de los organismos del fondo marino encontramos a los corales duros o escleractinios, que son colonias de miles de pequeños organismos capaces de construir estructuras de carbonato de calcio que les sirve de soporte (tipo esqueleto), formando sitios irregulares que funcionan como refugios y lugares de alimentación para otras especies. Por estos y otros beneficios que brindan, son un elemento clave para la conservación y recuperación de los ecosistemas de

arrecifes coralinos. En la expedición científica se realizaron dos metodologías para el estudio de los corales duros: la primera fue para obtener información a gran escala del Arrecife Alacranes; la segunda es una metodología (fotogrametría) para estudiar los arrecifes de coral con una escala más fina del detalle de los organismos presentes que permite dar seguimiento a largo plazo de los cambios más sutiles.

La primera metodología se aplicó en 98 sitios, en cada uno se realizaron censos por video-transectos de 50 metros de largo por 0.6 metros, cubriendo un área de 30 metros cuadrados; como resultado se registraron 30 especies de corales duros, de los cuales nueve especies representaron el 90 % de la abundancia (Anexo 2 y 3). Al agrupar las especies de corales duros por estrategia de vida, se encontró que en su mayoría predominan del tipo de vida estrés-tolerante, lo que es importante de considerar al momento de plantear un manejo para su recuperación (Figura 7).

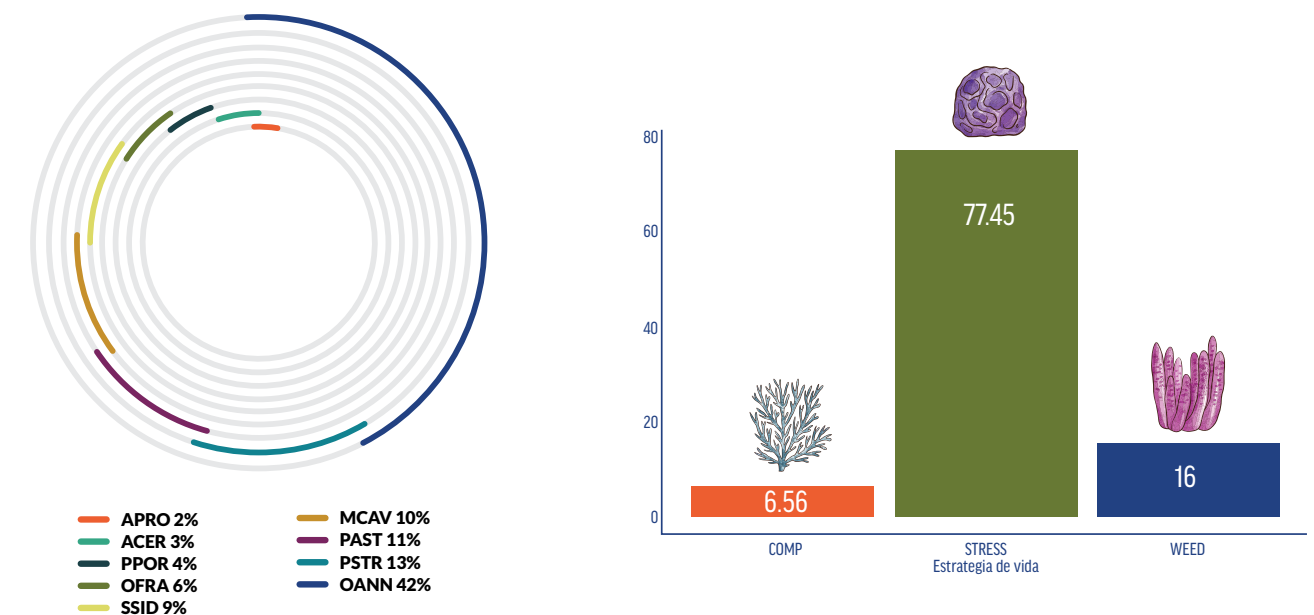


Figura 7. Especies de corales duros más abundantes en el PNAA, a la izquierda el porcentaje de las nueve especies más abundantes, donde las tonalidades de rojo y naranja están asociadas a especies de estrategia de vida estrés-tolerante (STRESS), el color verde a la estrategia de vida ruderal (WEED) y el azul a la estrategia competitiva (COMP). Abreviaciones: OANN: *Orbicella annularis*, PSTR: *Pseudodiploria strigosa*, PAST: *Porites astreoides*, MCAV: *Montastraea cavernosa*, SSID: *Siderastrea siderea*, OFRA: *Orbicella franksi*, PPOR: *Porites porites*, ACER: *Acropora cervicornis* y APRO: *Acropora prolifera*. En la derecha, el porcentaje por estrategia de vida de los corales duros en 98 puntos de monitoreo en 2022.

PECES

Otro de los indicadores que se consideró para la evaluación de la salud arrecifal fue la biomasa de peces (peso de los peces), la cual se calcula conociendo las tallas y el número de cada una de las diferentes especies registradas en los monitoreos. Para el conocimiento de peces del Arrecife Alacranes, también se utilizaron dos metodologías. Con la primera se obtuvieron datos por censos visuales y se visitaron un total de 111 sitios. La segunda utilizó los censos *in situ* además de videograbación en ocho sitios. En ambos casos se obtuvo la riqueza y abundancia de peces, además de la talla para estimar la biomasa de cada especie. La información obtenida se complementa entre ambas investigaciones. A continuación, los resultados.

Con la primera metodología se registraron 116 especies de peces pertenecientes a 32 familias, siendo 19 especies las que representaron el 90 % de la abundancia (Figura 8). Con la información obtenida se estimó la biomasa para cada especie y por grupo de alimentación: herbívoros (consumen algas y plantas marinas), invertívoros (se alimentan de invertebrados marinos), omnívoros (ingieren plantas y animales marinos), carnívoros (su alimento base son otros animales marinos, incluyendo peces) y depredadores topos (por ejemplo, tiburones). Conocer la información de estos grupos es relevante ya que permite conocer las amenazas que impactan el estado de salud de los arrecifes coralinos y así orientar las acciones de manejo para conservarlos. Por un lado, los peces herbívoros son considerados los jardineros de los arrecifes, al controlar el crecimiento de las algas y dar más oportunidad al arrecife de recuperarse ante estrés térmico o exceso de nutrientes. Por otro lado, los peces carnívoros y depredadores son blanco en las principales pesquerías. Debido a esto, los arrecifes saludables están caracterizados por mayores biomásas de herbívoros, carnívoros y depredadores.



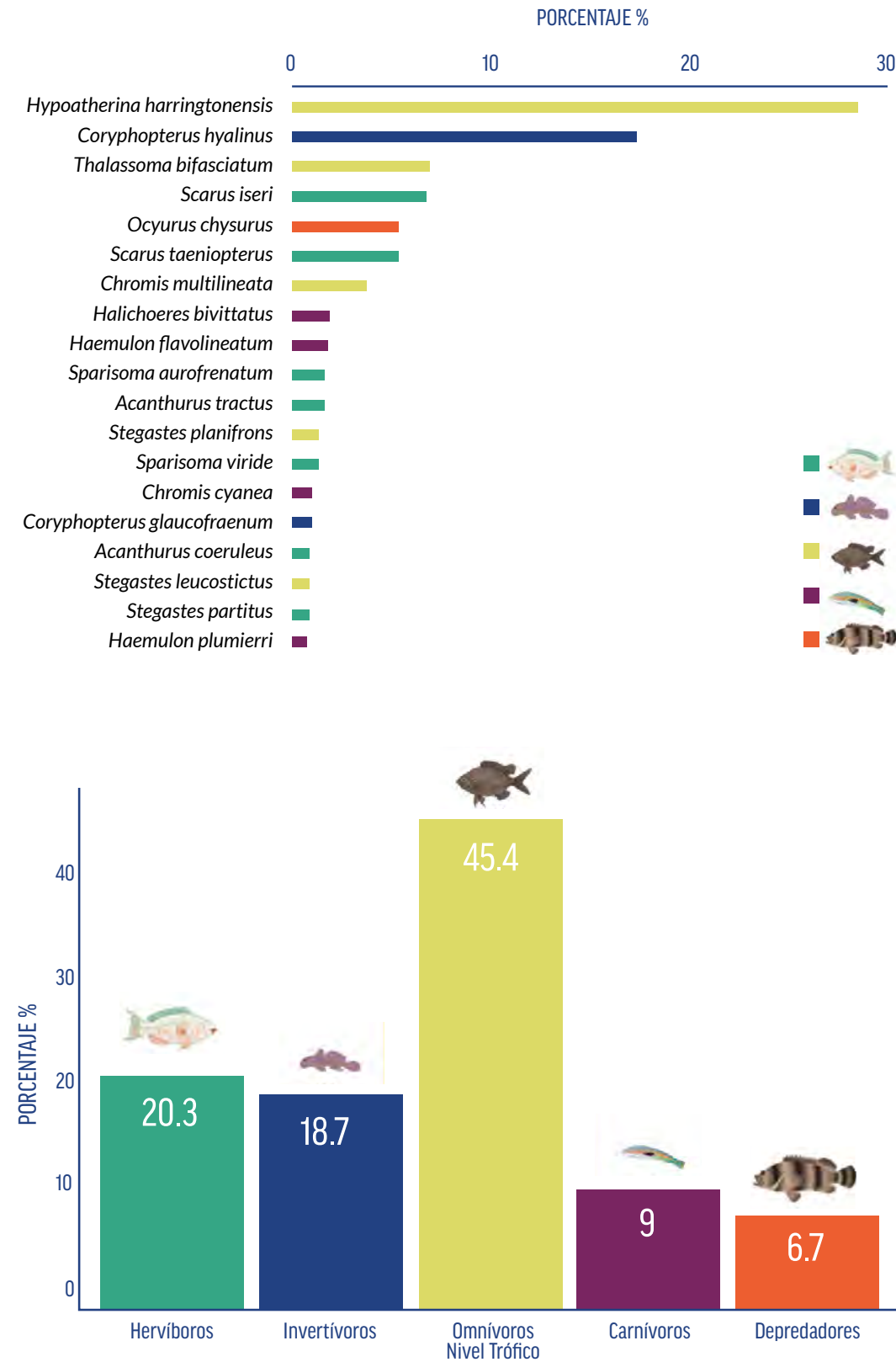


Figura 8. Especies más abundantes. Arriba, las 19 especies que representaron el 90 % de la abundancia de peces ordenadas de forma descendente. Abajo, la abundancia de peces según el tipo de alimentación. Los colores corresponden tipo de alimentación de las especies: verde son especies herbívoras, azul especies invertívoras, amarillo especies omnívoras, morado especies carnívoras y naranja depredadores.

Por otro lado, los peces omnívoros fueron los más abundantes y estuvieron representados por peces de talla pequeña de la familia Atherinidae, así como por Lábridos y Pomacéntridos (Figura 9). Le siguieron en abundancia los herbívoros, representados por los peces cirujanos y loros, seguidos por los invertívoros, en su mayoría góbidos de talla muy pequeña. Entre los peces carnívoros y depredadores más abundantes, encontramos Hemúlidos y Pargos, que incluyen especies que son blanco de las principales pesquerías de escama de la península de Yucatán, como la rubia, el canane y el chac-chi. Es decir, las mayores biomazas se registraron en los grupos de peces herbívoros, carnívoros y depredadores que tuvieron tallas más grandes, lo cual indica un ambiente saludable y mayor probabilidad de los arrecifes de recuperarse ante eventos relacionados al cambio climático.



Figura 9. Ejemplo de las especies de peces más abundantes durante los monitoreos en el PNA en 2022. Arriba el tinicalo de arrecife (*Hypoatherina harringtonensis*) que alcanza una longitud hasta de 2.5 cm, abajo el Gobio cristal (*Coryphopterus hyalinus*) que en promedio mide seis cm.

Por otra parte, con la segunda metodología se registraron un total de 58 especies de peces (26 familias y 14 órdenes). Entre ambas metodologías se identificaron un total de 125 especies de peces en el PNAA, es decir, más del 55 % de las especies registradas para el ANP (Anexo 4). La información obtenida es de gran valor para la actualización del Programa de Manejo, tanto por las especies comerciales como las especies clave registradas en la expedición.

La talla de los peces es importante, pues además de poder estimar la biomasa, nos da información sobre la edad aproximada de los individuos que varía de acuerdo con cada especie. En la expedición se registró un promedio de las tallas de los peces menor a 50 cm, lo que significa que para algunas especies que son de tallas por arriba de ese promedio fueron pocos los individuos adultos que se observaron. Cabe destacar que muchas especies presentes en el PNAA no crecen más de 30 cm (damiselas, principalmente). De continuar esa tendencia sería necesario tomar medidas para incrementar el número de peces que llegue a etapa adulta para asegurar la reproducción y conservación de sus poblaciones. Encontrar organismos juveniles en el parque realza la importancia del sitio como zona de crianza para muchas especies de peces. En el caso de los peces loro, ángel, pargos y meros, es necesario continuar su protección dentro del Parque para incrementar el número de peces que llegue a etapa adulta para asegurar la reproducción y conservación de sus poblaciones. Por otro lado, los peces que registraron mayores tallas fueron los peces ángeles del género *Pomacanthus*, así como los peces loro *Scarus coeruleus* y *Scarus coelestinus*, lo que beneficia la conservación de los arrecifes de coral del PNAA al mantener en equilibrio el crecimiento de las algas de las que se alimentan, permitiendo así el crecimiento de los corales.

Con respecto a la estimación del peso, fueron cinco especies que se encontraron por arriba de 1 kg (Figura 10). Por ejemplo, especies comerciales como cabrilla payaso (*Epinephelus adscensionis*) y negrillo o cherna negrillo (*Mycteroperca bonaci*) tuvieron un peso estimado de 0.5 y 1.5 kg respectivamente, considerando que la cabrilla payaso alcanza los 4.5 kg y el negrillo puede pesar hasta 100 kg [14] (Figura 11) el peso promedio fue bajo.

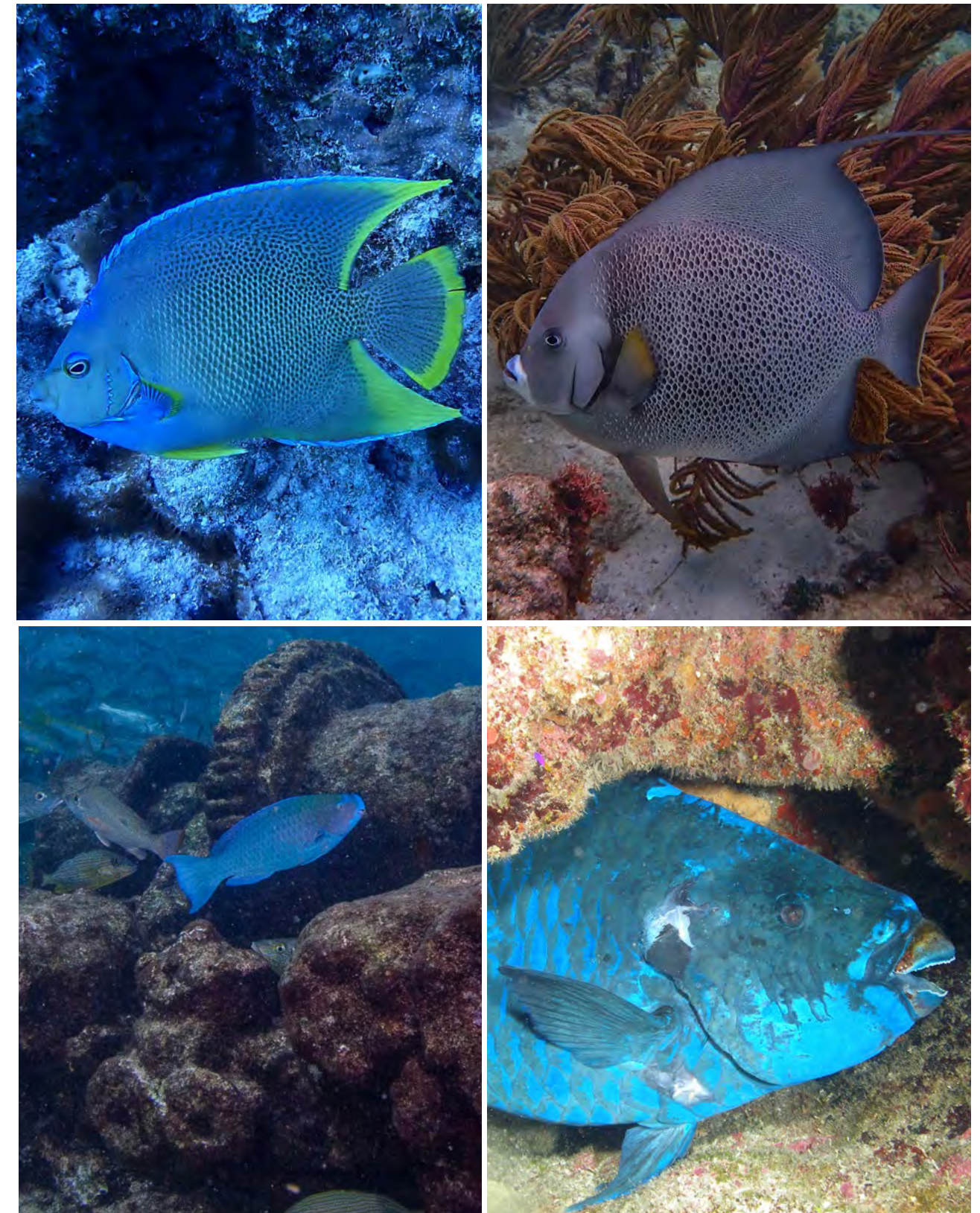


Figura 10. Ejemplo de las especies de peces con peso por arriba de 1 kg, observadas durante los monitoreos en el PNAA en 2022. Arriba, a la izquierda pez ángel azul (*Holacanthus bermudensis*), a la derecha pez ángel gris (*Pomacanthus arcuatus*). Abajo, a la izquierda pez loro azul (*Scarus coeruleus*), a la derecha pez loro (*Scarus coelestinus*).



Figura 11. Ejemplo de especies de peces de importancia comercial registradas durante los monitoreos en el PNAA en 2022. Arriba, mero *Nasau (Epinephelus striatus)*. Abajo, a la derecha, boquinete (*Lachnolaimus maximusi*) y a la izquierda pargo cola amarilla (*Holacanthus bermudensis*).

En general, la mayor abundancia de peces y tallas más grandes se observaron en los sitios donde el arrecife presenta más irregularidades (como grietas, oquedades, etc.), es decir, lugares donde hay mayor número de escondites donde refugiarse con estructuras de corales en buenas condiciones. Por el contrario, en sitios con fondo arenoso la cantidad de peces observados fue menor. Cabe mencionar que se encontraron sitios de la zona de amortiguamiento con una mayor biomasa que en otros sitios de la zona núcleo, por lo que es importante considerar conservar estos sitios en zona núcleo, con el objetivo de preservar la complejidad del sistema arrecifal y la biodiversidad asociada, ya que muchas especies de peces dependen del PNAA para mantener sus poblaciones en ecosistemas cercanos, además de ser sustento para la pesca regional.

ESTIMACIÓN DE LA SALUD ARRECIFAL DEL PNAA

A partir de los datos obtenidos en campo, fue posible estimar la salud del ecosistema de los arrecifes del PNAA con el Índice de Salud Simplificado [15] que incluye los indicadores de salud: a) cobertura de coral duro, b) cobertura de macroalgas, c) biomasa de peces herbívoros claves (peces cirujanos y loros), d) biomasa de peces de interés comercial (pargos y meros). Además, se evaluó la condición de salud de las colonias de corales, pudiendo observar la afectación del blanqueamiento, la prevalencia de enfermedades e indicios de eventos de mortalidad reciente y pasada. Con el Índice de Salud Simplificado se analizaron un total de 20 mil 565 corales duros de 98 sitios y se observó que el 85 % de los corales registrados presentó una condición normal. Para los indicadores de cobertura de macroalgas, biomasa de peces herbívoros y peces de interés comercial, más del 50 % de los arrecifes evaluados obtuvieron calificaciones del estado “Bueno” y “Muy bueno”. Sin embargo, el indicador de salud con menor calificación fue la cobertura de coral duro, ya que solo el 20 % de los sitios obtuvieron calificaciones de “Bueno” o “Muy bueno” (Figura 12).

En relación con los hábitats, el indicador que obtuvo calificaciones más bajas fue la cobertura coralina, que llega a niveles críticos en algunos hábitats como los arrecifes con macroalgas y poca cobertura de coral duro; planicies de arena con algas y poca cobertura de corales duros. La cobertura de macroalgas fue

en promedio alta en algunos hábitats como los arrecifes con macroalgas y poca cobertura de coral duro; arrecife dominado por corales blandos, y estructuras dominadas por macroalgas, lo que resulta en calificación “Baja”. En el caso del indicador de las biomásas de los peces herbívoros, en la mayoría de los hábitats, la calificación es “Bueno”. Para el indicador de la biomasa de los peces comerciales, la mayoría de los hábitats tienen calificaciones “Muy bueno” y “Bueno”.

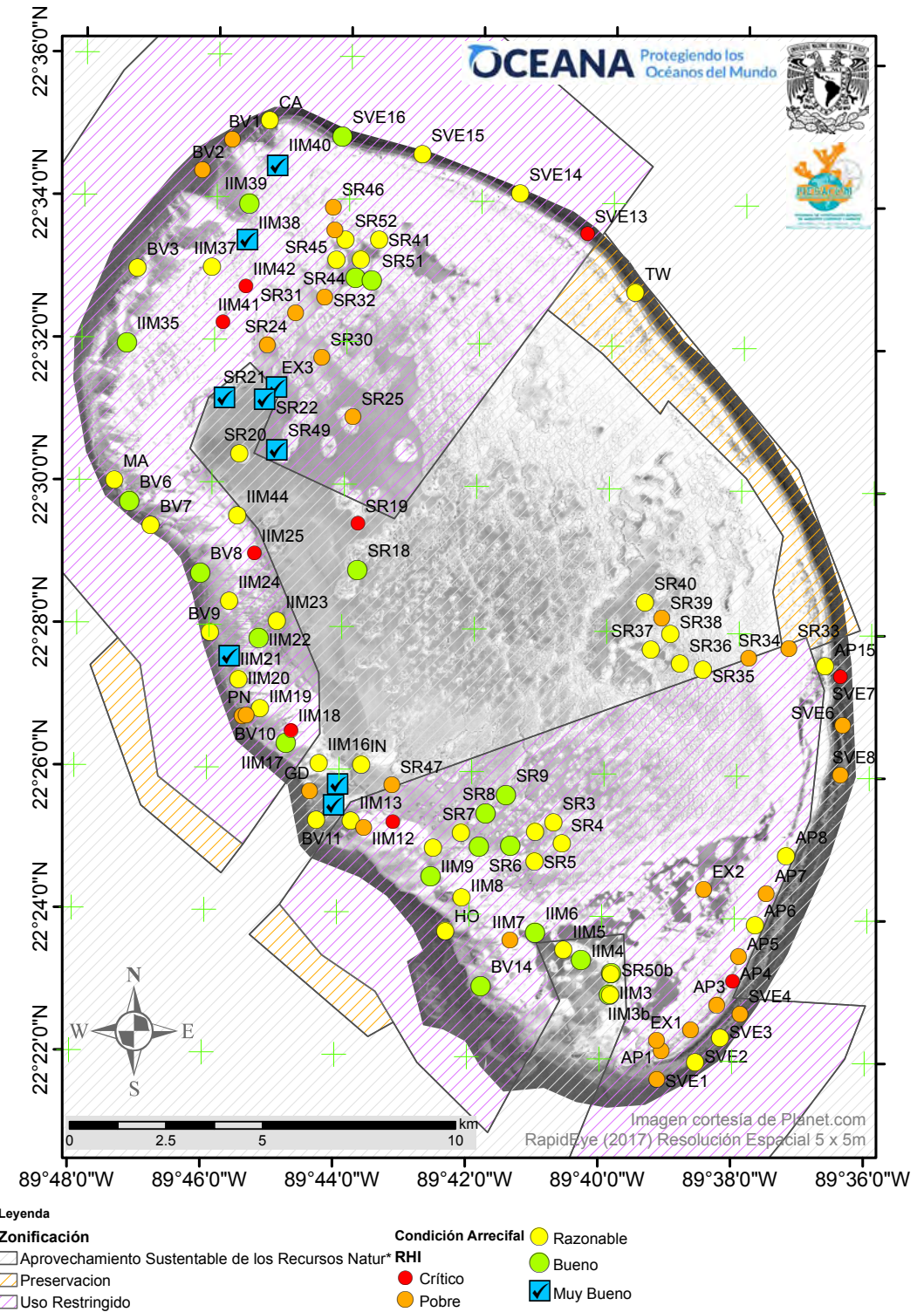


Figura 12. Sitios visitados para la investigación sobre el estado actual de la condición de salud del arrecife en el PNA. En sombreado morado las zonas núcleo sur y norte, en sombra gris la zona de amortiguamiento, en sombra anaranjada las zonas de preservación. El color de los círculos muestra el resultado de la evaluación de la condición arrecifal: rojo es Crítico, anaranjado es Pobre, amarillo es Razonable, verde Bueno, y cuadro azul Muy Bueno.

Por otro lado, hablar de salud arrecifal también involucra reconocer las enfermedades que presentan los corales, en este sentido, la mortalidad vieja fue la principal afectación en corales, seguida del blanqueamiento y palidez, mientras que las enfermedades se encontraron presentes en menos del 1 % de los corales monitoreados. También se observó que en los hábitats dominados por macroalgas, los corales tienen mayor afectación por palidez y enfermedades como banda negra y puntos oscuros (Anexo 5). De manera general, en la zona núcleo norte las afectaciones de corales por enfermedades y mortalidad fue menor en comparación con los corales de la zona núcleo sur. Es decir, los sitios con mayor cobertura de corales duros, menor cobertura de macroalgas, mayores biomásas de peces herbívoros y peces comerciales son considerados con mejor estado ecológico y con mayor capacidad para persistir ante los cambios que se presenten [15].

3.2. Cambios entre los tipos de hábitats en el PNAA

A partir de los datos en campo, se realizó un análisis con sistemas de información geográficos para conocer los cambios que han tenido los hábitats de Arrecife Alacranes, entre 2000 y 2022. Los resultados mostraron que la mayor parte del arrecife (casi 60 %) sufrió cambios negativos, asociados a la pérdida de cobertura coralina y al aumento en macroalgas. Una tercera parte (poco más del 31 %) está asociada principalmente con arena y cascajo con cobertura escasa sin cambios, y solo alrededor del 9 % del arrecife tuvo cambios positivos, principalmente asociados a la disminución de la cobertura de macroalgas sobre estructuras coralinas (Figura 13).

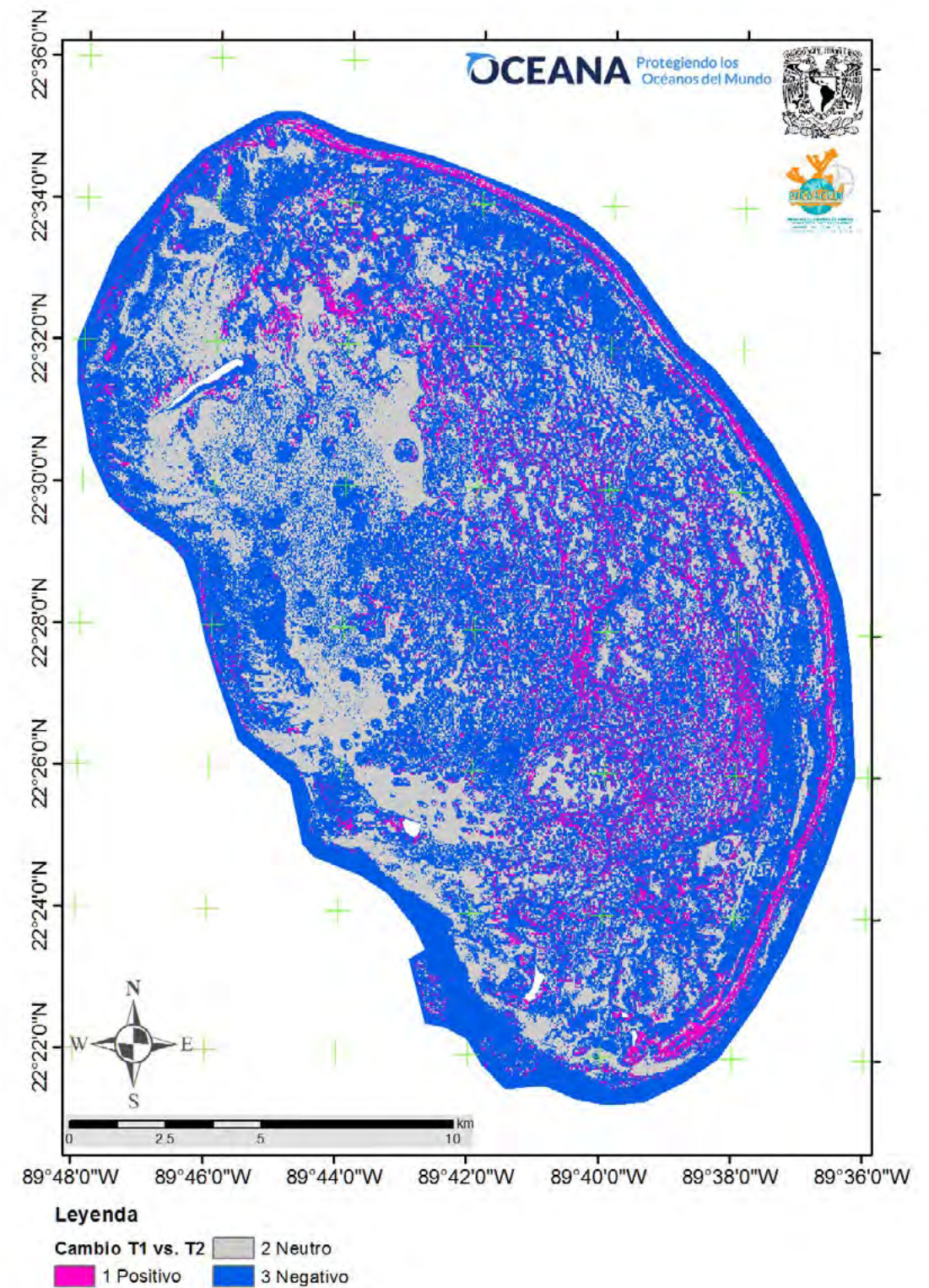
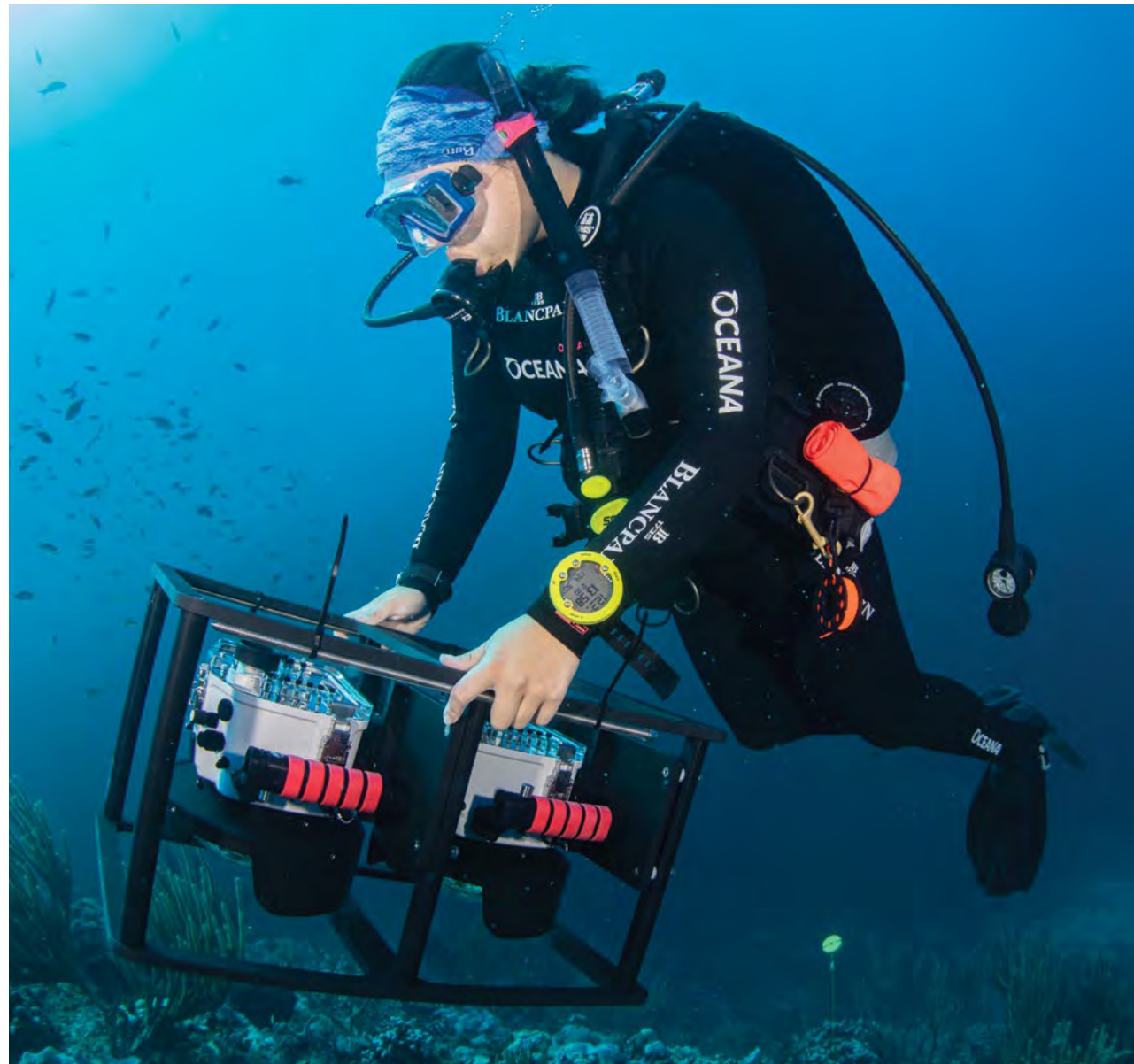


Figura 13. Mapa de los cambios entre los tipos de hábitats o fondos marinos del PNAA en 2000 (T1) y 2022 (T2). En rosa se observan los cambios positivos (8.96%), en gris los cambios neutros (31.09 %) y en azul los cambios negativos (59.94 %).

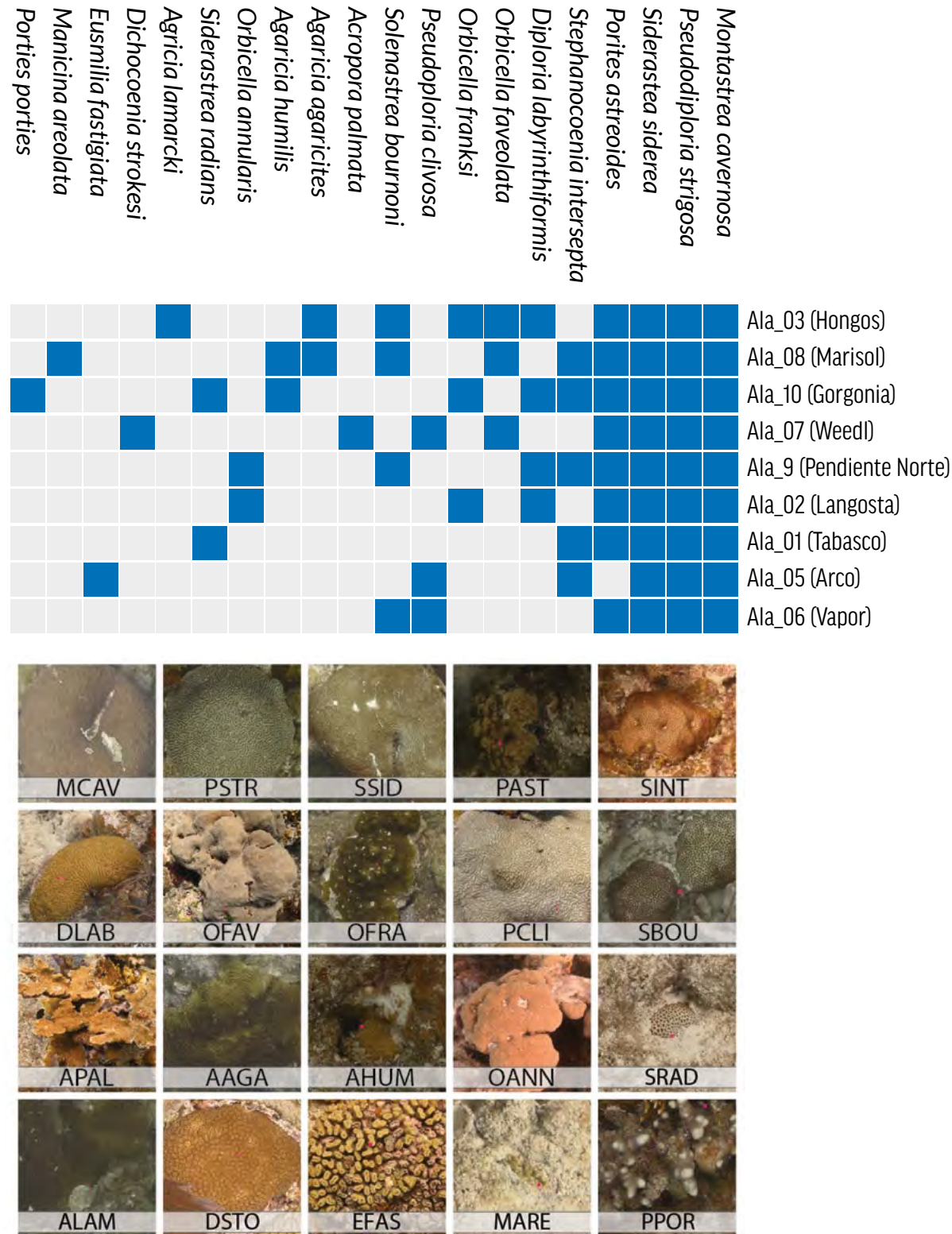


3.3. Mapas 3D del sistema arrecifal PNA

Como se había mencionado anteriormente, el uso de la fotogrametría en la expedición fue otra herramienta de gran apoyo para el estudio de los corales y organismos bentónicos en Arrecife Alacranes. La fotogrametría es una técnica que se basa en la recopilación de información de la posición y dimensión de objetos a partir de dos o más fotografías [16]. Las fotografías se consideran la información primaria, y los productos resultantes son modelos 3D obtenidos luego del procesamiento de las imágenes en el laboratorio [17, 18].

Corales duros						
Corales blandos						
Algas carnosas						
Algas calcáreas						
Cianobacterias						
Eponjas						
Otros invertebrados						
Pedacería coralina						
Arena						
Macizo calcáreo						
Estructuras de coral muerto						

Figura 14. Imágenes de las características del arrecife identificadas en los nueve mapas 3D del PNA.



A partir de los mapas 3D se analizaron varios aspectos de los ecosistemas de arrecifes de coral, uno de ellos fue la rugosidad. El término rugosidad en el contexto de los arrecifes se refiere a la complejidad topográfica del fondo marino, que nos permite darle valores al ambiente de acuerdo con las estructuras calcáreas que forman los corales duros, y que son responsables de brindar a otros organismos refugio, protección contra depredadores y heterogeneidad del hábitat. Una alta rugosidad o heterogeneidad topográfica se puede asociar con hábitats en buen estado de conservación. Los resultados muestran alta heterogeneidad topográfica (rugosidad) junto con sitios relativamente planos dominados por piedra caliza, pedacera coralina y arena, y otros sitios más complejos con estructuras coralinas que brindan rugosidad al ecosistema, lo que promueve una mayor diversidad de especies (Anexo 7). Los valores más altos de rugosidad fueron en los sitios: Tweed, dominado por las especies coralinas *Pseudodiploria strigosa* y *Pseudodiploria clivosa*; Gorgonia Delfin, dominado por las especies de coral *Montastraea cavernosa* y *Siderastrea siderea*; y Pendiente Norte donde predominó *Montastraea cavernosa* (Figura 16). Los sitios que presentaron valores bajos de rugosidad fueron Langosta, Vapor y Hongos. Cabe señalar que el sitio Tweed está fuera de la zona núcleo a pesar de contar con alta diversidad, por lo que es necesario señalar su importancia para la conservación de los arrecifes en el PNAA e incluir a los sitios de alta diversidad que actualmente están en zonas de amortiguamiento dentro de las zonas núcleo.

Figura 15. Imagen de las especies de corales observadas con el método de fotogrametría. La nomenclatura es siguiendo el protocolo AGRRA. *Montastraea cavernosa* (MCAV), *Pseudodiploria strigosa* (PSTR), *Siderastrea siderea* (SSID), *Porites astreoides* (PAST), *Stephanocoenia intersepta* (SINT), *Diploria labyrinthiformis* (DLAB), *Orbicella faveolata* (OFAV), *Orbicella franksi* (OFRA), *Pseudodiploria clivosa* (PCLI), *Solenastrea bournoni* (SBOU), *Acropora palmata* (APAL), *Agaricia agaricites* (AAGA), *Agarcia humilis* (AHUM), *Orbicella annularis* (OANN), *Siderastrea radians* (SRAD), *Agaricia lamarki* (ALAM), *Dichocoenia stokesi* (DSTO), *Eusmilia fastigiata* (EFAS), *Manicina areolata* (MARE), *Porites porites* (PPOR).

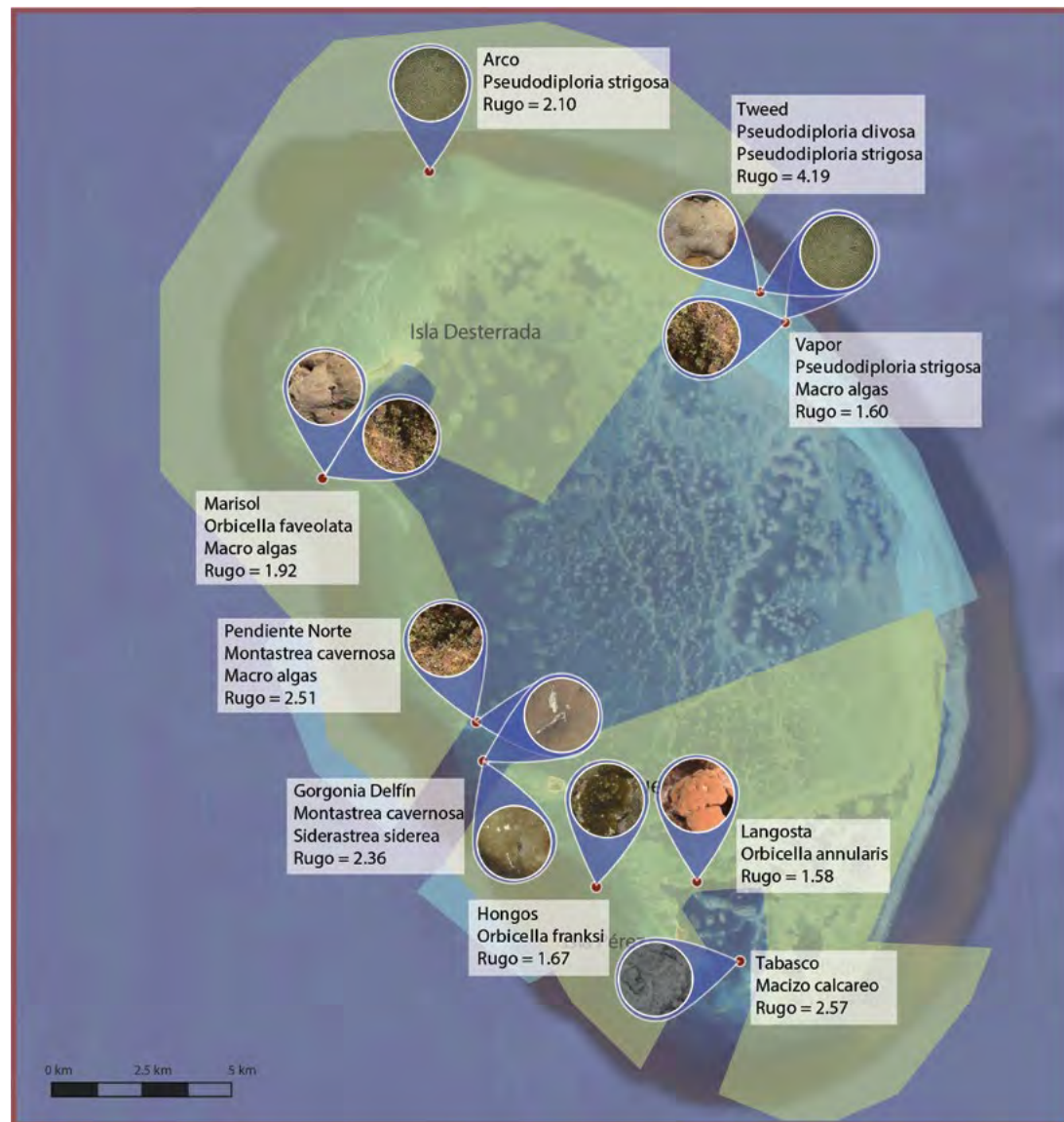


Figura 16. Mapa del PNAA con los nombres de los sitios monitoreados con la metodología de fotogrametría. Los valores de rugosidad o heterogeneidad topográfica del arrecife, junto con las especies coralinas claves asociadas de acuerdo con su aporte a la complejidad topográfica (se presenta el valor de rugosidad como $Rugo = \text{rugosidad}$). En verde, las zonas núcleo sur y zona núcleo norte; en azul claro la zona de amortiguamiento.

3.4. Escenarios de priorización del PNAA

A partir de la información actualizada obtenida de los monitoreos del fondo marino, de la diversidad del bentos, los corales duros (diversidad y estado de salud), los peces (diversidad y biomasa) y los cambios comparados entre la distribución de los tipos de hábitats del PNAA en un periodo de dos décadas, se elaboró un mapa to-

mando en cuenta las características y funciones ecológicas para la persistencia y resiliencia (capacidad de recuperación) del arrecife de coral. Al mapa se le fueron asignando valores a los fondos marinos de 1 a 3, donde la importancia alta correspondió al valor 1 (es decir, fondos dominados por corales duros, así como a las camas densas de pastos marinos), la importancia media al valor 2 (donde se agruparon los fondos con coberturas regulares de coral), y la importancia baja al valor 3 (incluyendo los fondos con baja cobertura de coral y fondos dominados por macroalgas).

Para conocer los usos y la intensidad con que se realiza cada uno en las zonas núcleo sur, zona núcleo norte y el área de amortiguamiento, se realizó un ejercicio de consulta participativa con actores claves, quienes identificaron en distintos mapas del PNAA los usos e intensidad que hay en los sitios para las actividades de: a) uso pesquero comercial, b) uso pesquero deportivo, c) uso turístico y de visitación (incluyendo buceo), y d) uso por pesca furtiva o ilegal. Para cada uno de estos usos se definió una escala de cuatro niveles que determinaron la intensidad en: a) alta intensidad; b) intensidad media; c) baja intensidad, y d) ausente. Posteriormente se integró la información en un Sistema de Información Geográfica para visualizar toda la información en un mapa para cada tipo de uso, y se incorporó la intensidad de uso considerando la gravedad del impacto que tiene en el sistema arrecifal, es decir, la pesca furtiva, al ser de alto impacto, tuvo un 40 %, ya que al extraer recursos del arrecife dañan el ambiente y a las cooperativas autorizadas; a las actividades como pesca comercial y deportiva se les dio el valor de 25 % a cada una ya que aunque tienen repercusiones en el ambiente sí están consideradas en el Programa de Manejo. Por último, al turismo se le asignó el valor más bajo del impacto en el ambiente con un 10 %. Al final se obtuvieron cuatro mapas de los usos de: pesca furtiva, pesca comercial, pesca deportiva y turismo, cada una con la intensidad de uso para cada uso (Anexo 8).

Con la información disponible se construyeron tres escenarios con diferente tipo de priorización para la conservación del PNAA descritos a continuación:

Escenario A

→ El Escenario A solo da prioridad a las zonas de conservación sin incluir los datos de intensidad de usos. Es decir, asignando Prioridad Alta a las áreas que son más importantes ecológicamente, independientemente de si existen usos en ellas. En este escenario se ponderó la distribución espacial del hábitat con un 40 %, y demás insumos ambientales (diversidad, complejidad, conectividad y cambio) con 15 %, resultando las zonas de Prioridad Alta a lo largo de la cresta arrecifal, la zona norte y el borde del PNAA como se observa en el siguiente mapa (Figura 17).

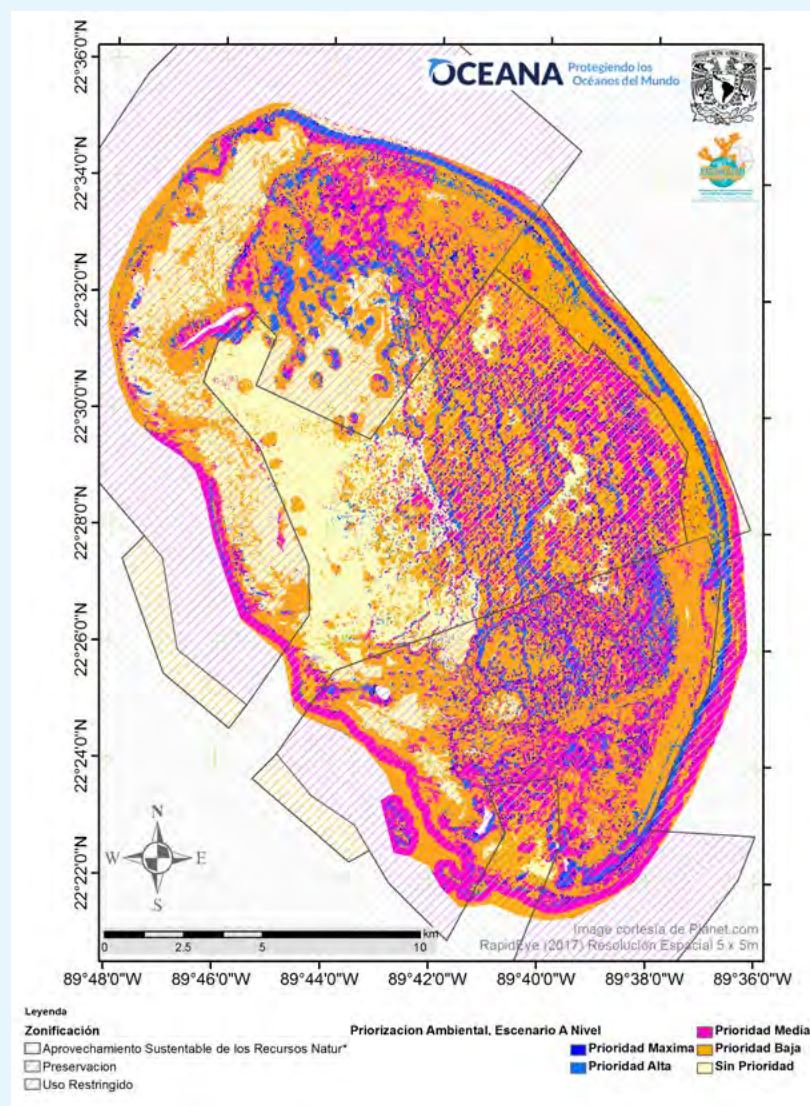


Figura 17. Escenario A de priorización de áreas de conservación (solo importancia ecológica), sin incluir sus usos ni sus intensidades. Se distinguen las zonas núcleo sur y norte, así como la zona de amortiguamiento. En azul los sitios con Prioridad Máxima y Prioridad Alta, en rosa los sitios de Prioridad Media, en anaranjado los sitios de Prioridad Baja y Sin Prioridad los sitios que no incluyeron información a evaluar.

Escenario B

→ El Escenario B consiste en priorizar tanto el ambiente (importancia ecológica) como los usos moderados. En esta priorización, la estructura del hábitat tiene un valor de ponderación de 40 %, el cambio de los hábitats resultado de dos décadas; diversidad, complejidad y conectividad tienen un valor de 10 %, y para la intensidad de usos tiene un 20 %. Los niveles de prioridad de cada insumo son iguales que en el escenario anterior, excepto en el uso, donde la Prioridad Alta se otorga a las áreas con menor cantidad e intensidad de usos (Figura 18).

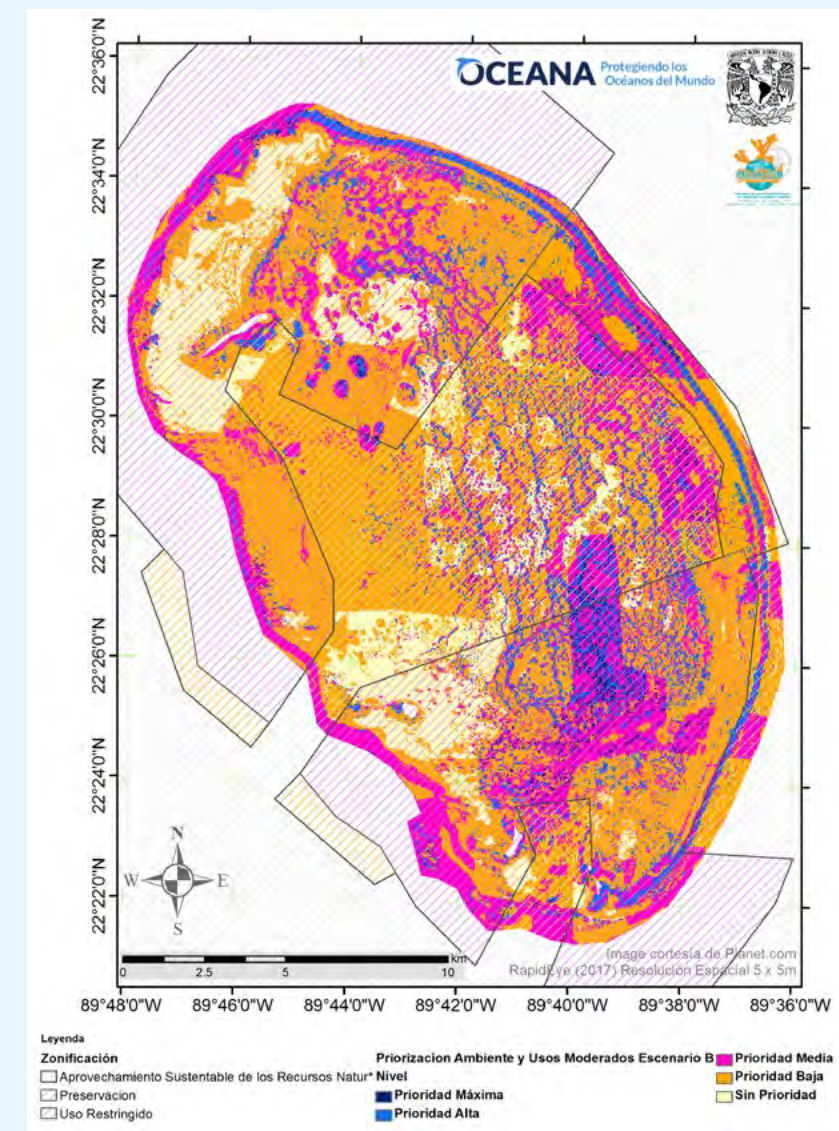


Figura 18. Escenario B de priorización de áreas de conservación, considerando la importancia ecológica y los usos poco intensos. Se distinguen las zonas núcleo sur y norte, así como la zona de amortiguamiento. En azul los sitios con Prioridad Máxima y Prioridad Alta, en rosa los sitios de Prioridad Media, en anaranjado los sitios de Prioridad Baja y Sin Prioridad los sitios que no incluyeron información a evaluar.

Escenario C

→ El Escenario C consiste en priorizar tanto el ambiente como los usos más intensos. Corresponde a la aproximación tradicional de priorización espacial en donde las zonas definidas con mayor presencia e intensidad de uso tienen la prioridad más alta del insumo. Y los otros insumos se definen con la escala de prioridades mencionada anteriormente (Figura 19).

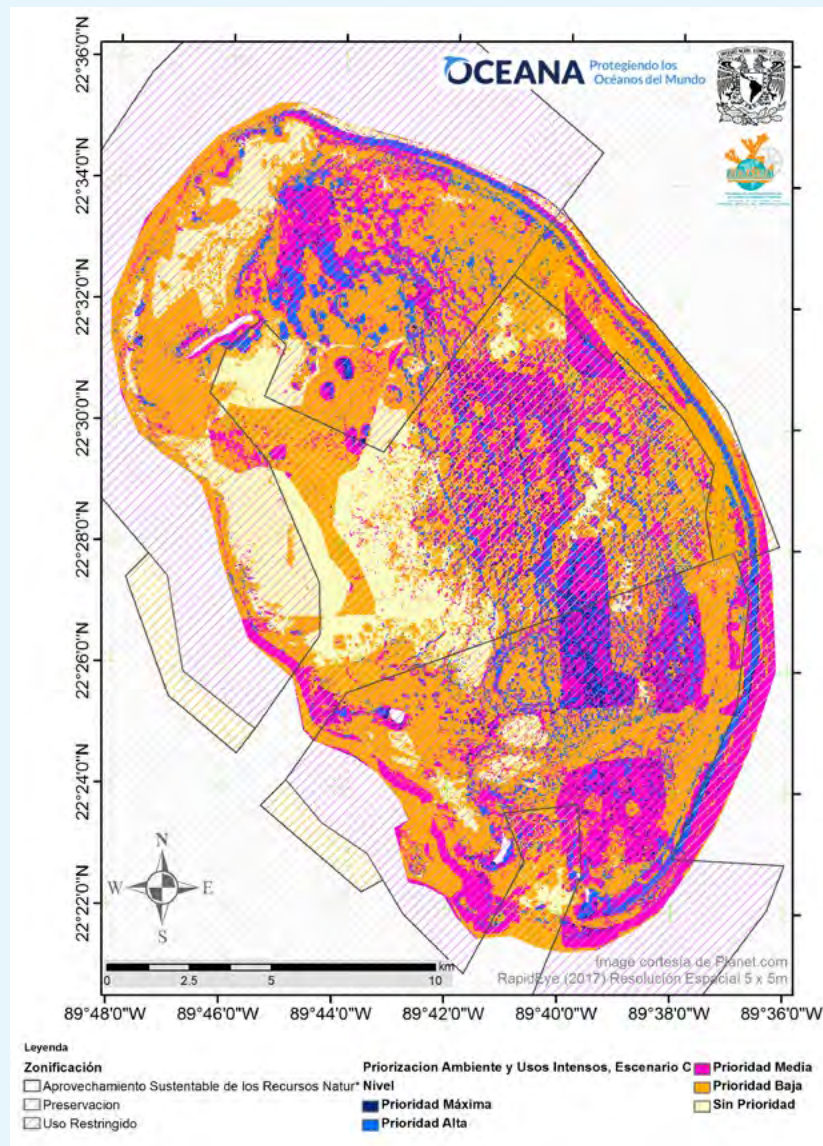


Figura 19. Escenario C de priorización de áreas de conservación, tomando en cuenta la importancia ecológica, los usos de alto impacto y su intensidad. En azul los sitios con Prioridad Máxima y Alta, en rosa los sitios de Prioridad Media, en anaranjado los sitios de Prioridad Baja y Sin Prioridad los sitios que no incluyeron información a evaluar.

En los tres escenarios se mantienen con poca variación los patrones de Prioridad Alta, estas incluyen estructuras de parches al sureste de isla Desterrada, estructuras en las zonas del arrecife posterior, cresta arrecifal y frente arrecifal a sotavento de la plataforma arrecifal (borde de la plataforma) y estructuras del sistema de parches coralinos reticulados en la porción central de la plataforma (en medio de la zona de amortiguamiento). Los sitios de prioridades media, baja y sin prioridad son las que tienen mayor variación dependiendo de los usos y su intensidad.



3.5. ADN ambiental en el PNAA

Finalmente, y no menos importante, fue la investigación por medio de ADN ambiental en el PNAA, la cual permitió conocer la presencia de un gran número de especies en poco tiempo, cuya presencia no hubiéramos podido descubrir a simple vista. La técnica consiste en coleccionar agua del mar y filtrar, para luego, en el laboratorio, estudiar los fragmentos de ADN de los organismos y determinar los seres vivos que se encuentran presentes en los sitios muestreados (Figura 20). Durante la expedición, se tomaron 36 muestras de ADN ambiental en 12 sitios, abarcando las zonas núcleo sur y norte, así como zonas de amortiguamiento del PNAA (Anexo 9).

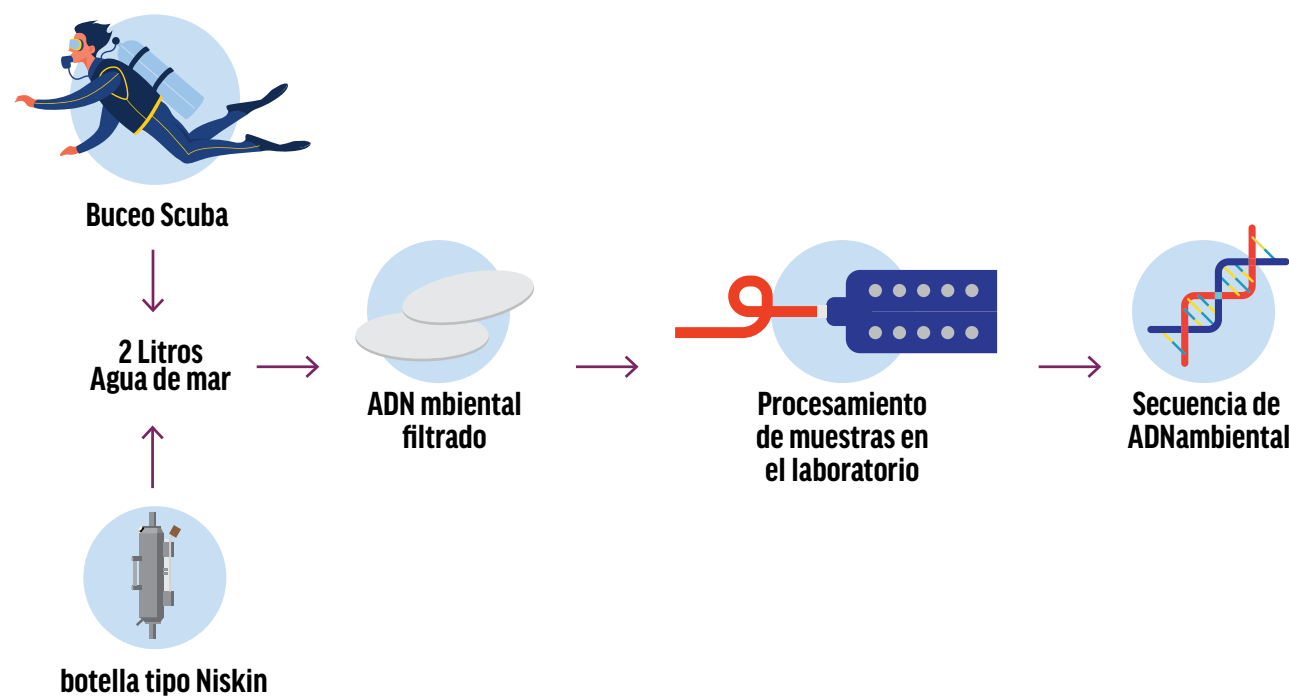


Figura 20. Metodología para la obtención del ADN ambiental, para obtener dos litros de agua en sitios poco profundos se utilizó equipo Scuba y en sitios profundos la botella tipo Niskin. Las muestras se filtraron y guardaron para procesarlas en el laboratorio y obtener las secuencias del ADN de los organismos del ecosistema marino del PNAA.

En los sitios con poca profundidad (entre 2.5 y 30 m) se realizó la colecta del agua con buceo Scuba, mientras en cuatro sitios profundos (entre 48 y 59 m) se utilizó la botella oceanográfica tipo Niskin. En todos los casos se colectaron dos litros de agua marina que después de filtrarse fue devuelta en el mismo sitio. Posteriormente, las muestras tomadas en campo se procesaron en el laboratorio para obtener la información genética de las especies marinas presentes, donde se encontraron aproximadamente 40 millones de secuencias de ADN, a las que se les realizó un análisis bioinformático para obtener un listado de las especies para los grupos de interés (Cuadro 1). Es decir, fueron seleccionadas solo las secuencias (fragmentos de los genes) de grupos marinos de peces óseos (con esqueleto óseo duro) y elasmobranquios, como tiburones y rayas, así como eucariotas marinos, por ejemplo, animales, plantas y hongos [25, 26, 27].

Cuadro 1. Número de especies (OTUs)* detectados mediante ADN ambiental en los sitios de muestreo a nivel de grandes grupos.

Nombre del sitio	Eucariotas	Peces y tiburones	Micro y Macro Algas	Otros animales multicelulares
Hongos	440	31	140	300
Pendiente Norte	361	54	92	269
Interior Nuevo	327	28	103	224
Gorgonia Delfín	359	36	91	268
Marisol	410	48	122	288
Niskin 1 y 2	459	45	119	340
El Arco	551	88	155	396
Niskin 3	237	34	56	181
Tweed	565	105	195	370
Niskin 4	355	54	113	242

*Unidad Taxonómica Operativa (OTUs, por sus siglas en inglés, Operational Taxonomic Unit). Es una unidad de clasificación.

Una vez que se obtuvieron las secuencias de los grupos de interés, se encontró un total de mil 831 OTU (las cuales pueden considerarse como especies) de eucariotas, que pueden agruparse dentro de 29 grupos (Phylum) diferentes. Los grupos más diversos corresponden a los artrópodos (Arthropoda, representados por los crustáceos), seguido de algas microscópicas (Bacillariophyta), moluscos (Mollusca), algas rojas (Rhodophyta), gusanos anélidos (Annelida), corales, medusas y anémonas (Cnidaria). El resto de los grupos

mostró una riqueza de especies igual o por debajo de 44 especies (OTU). Para peces y tiburones, se encontraron 155 especies (OTU) (Figura 21). Mientras que de las 41 familias de peces y tiburones identificadas, las que tuvieron mayor número de especies fueron las damiselas y jaquetas, seguida de doncellas, cabrillas, meros, pargos, huachinangos y peces loros (Anexo 10). Esto es relevante al encontrarse especies de interés comercial y especies clave para el mantenimiento de los arrecifes de coral.

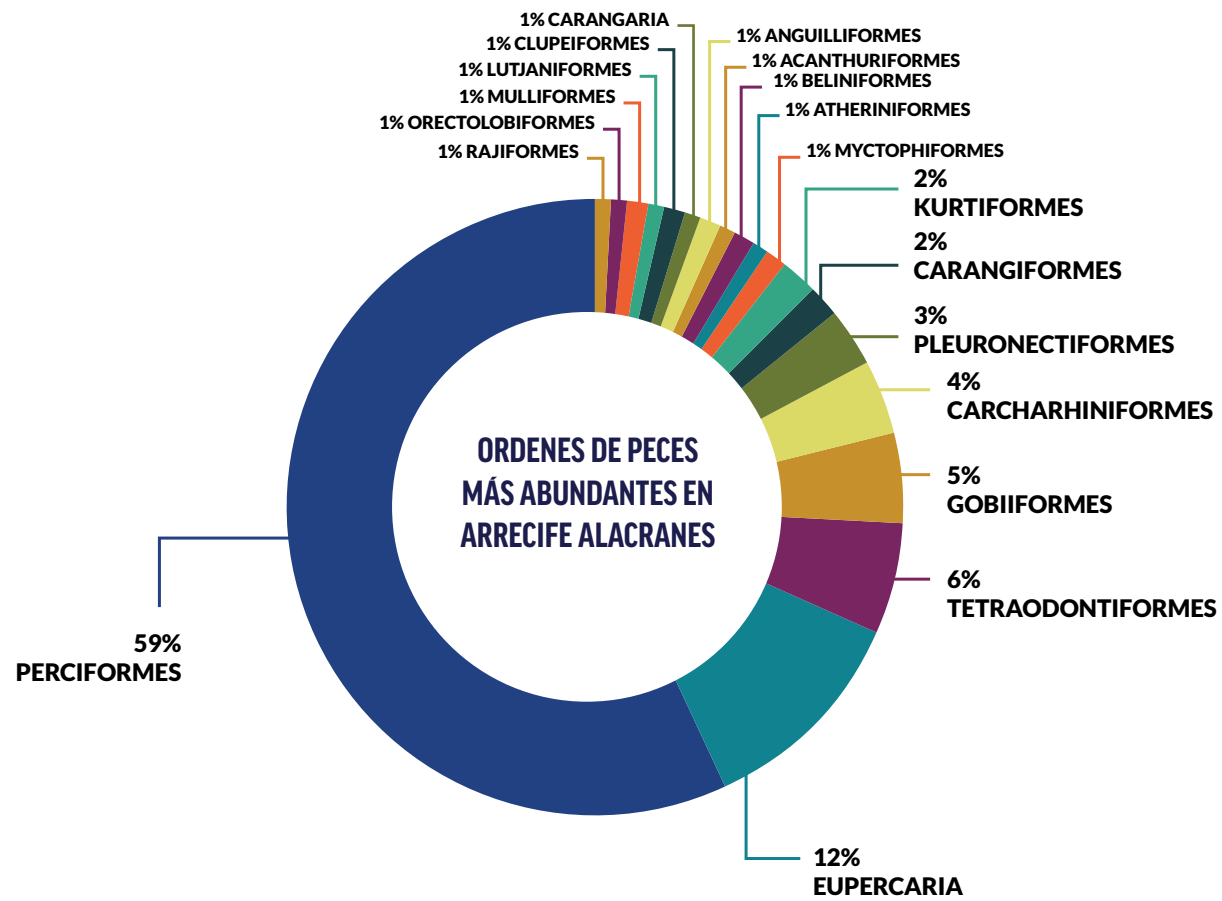


Figura 21. Resultados de las especies (OTU) de peces y tiburones a nivel de Órdenes detectados mediante ADN ambiental en Arrecife Alacranes durante la expedición científica en 2022.

En el análisis con ADN ambiental se observó que los sitios más diversos en el PNA se encuentran al noreste del área protegida, sobresaliendo los sitios Tweed y El Arco por presentar la mayor riqueza de especies (OTU), incluyendo el grupo de eucariotas y peces (Figura 22). Cabe destacar que en Tweed se registró la mayor diversidad marina con el método de ADN ambiental.

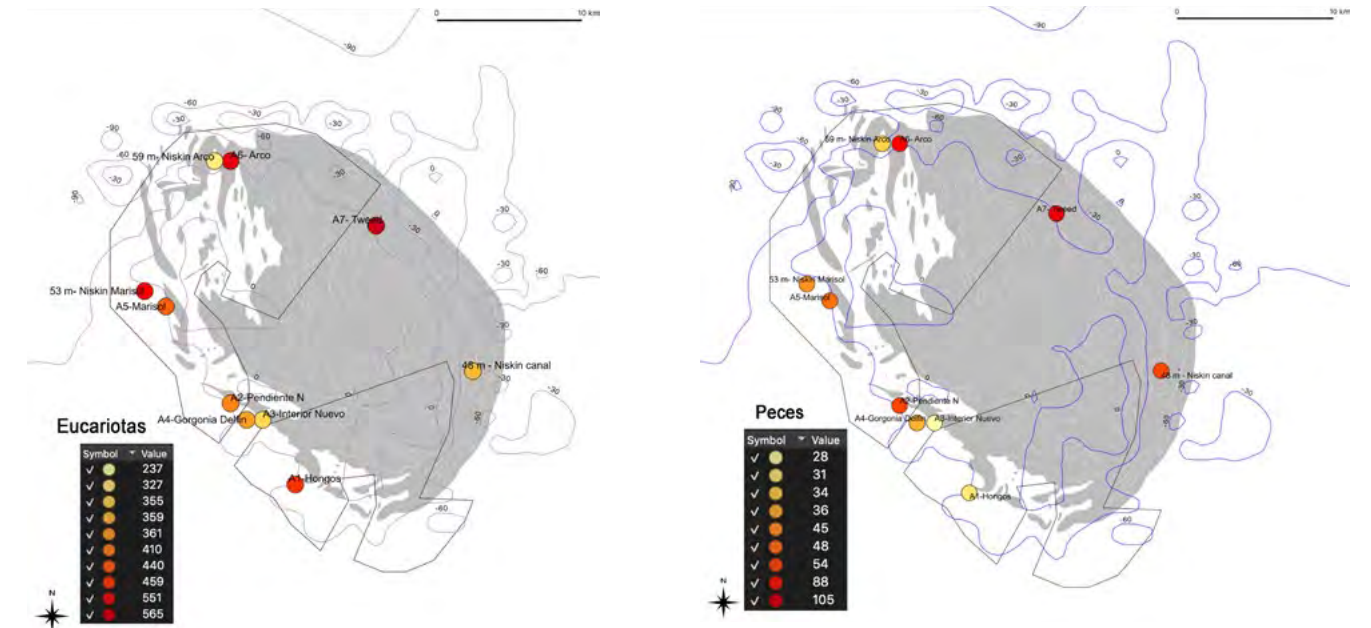


Figura 22. Riqueza de especies (OTU) de eucariotas (izquierda) y peces (derecha) observados mediante ADN ambiental en Arrecife Alacranes; el color rojo representa la mayor riqueza mientras que el amarillo es el valor menor. Se muestran los límites de la zona núcleo sur y norte en el PNA y las isobatas (profundidades) de 30 m. La simbología se muestra dentro de cada mapa abajo a la izquierda, siendo los colores amarillo claro los sitios con menor número de especies, mientras los tonos más rojos son los sitios con mayor número de especies.

El ADN ambiental permite detectar la presencia de especies difíciles de observar, como el caso de tiburones y rayas. De las 24 especies de tiburones registradas en el Programa de Manejo, se identificaron tres especies de tiburones y una raya, que corresponden al tiburón gambuso (*Carcharhinus obscurus*), considerado como “En Peligro” en la Lista Roja de la IUCN, el tiburón martillo cornuda cabeza de pala (*Sphyrna tiburo*) también clasificado “En Peligro”, el tiburón gata (*Ginglymostoma cirratum*) considerado como “Vulnerable” y la raya látigo chata (*Dasyatis say*) considerada “Casi Amenazada”.

Haciendo una comparación entre las especies reportadas en el Programa de Manejo del PNA [8] y las obtenidas con el análisis del ADN ambiental de este estudio, resulta que, para algunos grupos bien estudiados en Arrecife Alacranes, las especies reportadas en el Programa de Manejo es mayor o comparable a lo encontrado con el ADN ambiental (algas verdes, peces y moluscos) (Figura 23). Sin embargo, para los grupos menos estudiados, la diversidad encontrada con ADN ambiental es significativamente mayor a lo

reportado en el Programa de Manejo (algas cafés, algas rojas, diatomeas, dinoflagelados, esponjas, cnidarios, poliquetos, equinodermos y crustáceos). Esto pone en evidencia las ventajas de utilizar a la par el análisis del ADN ambiental junto con los censos *in situ* para el conocimiento de la diversidad de especies en el PNA.

COMPARACIÓN DE LA RIQUEZA DE ESPECIES A NIVEL DE REINOS EN ARRECIFE ALACRANES

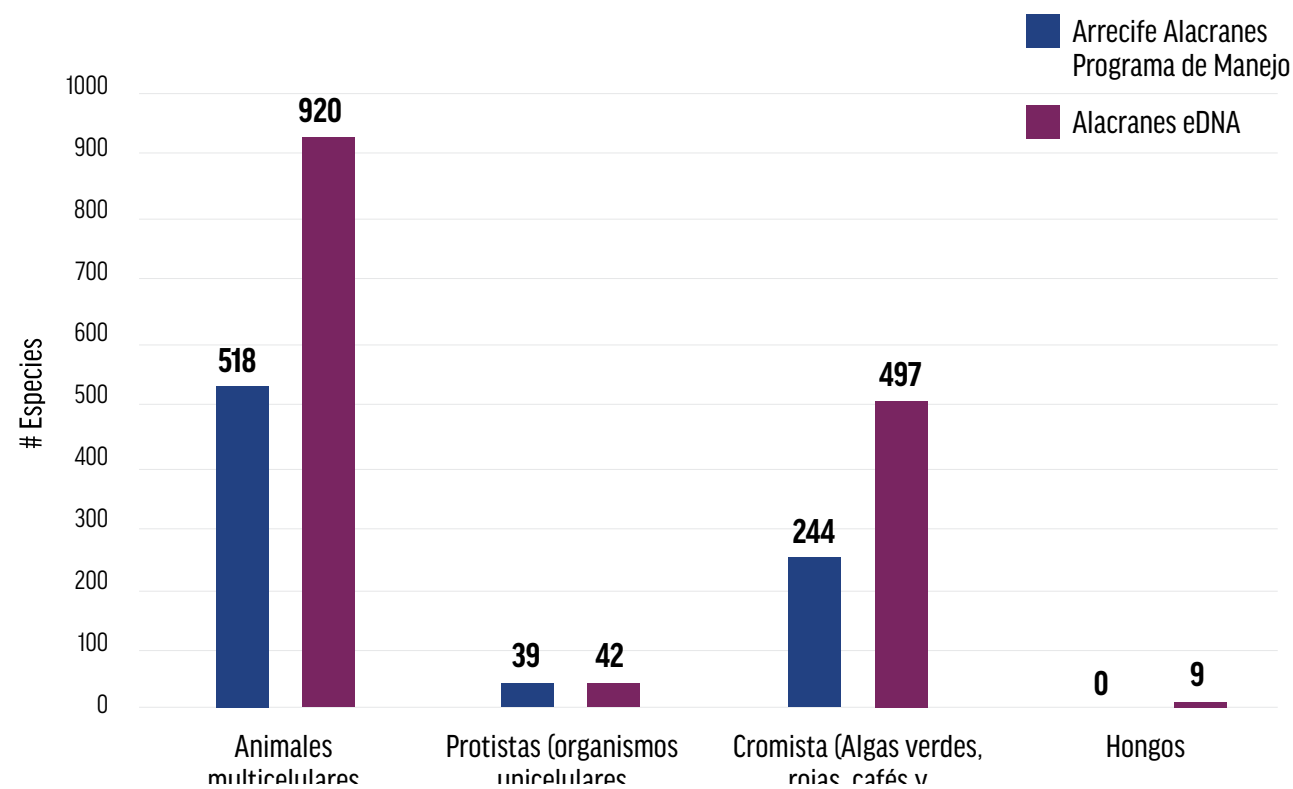


Figura 23. Comparación de la riqueza de especies de eucariotas a nivel de grandes grupos reportada en el Programa de Manejo del PNA y el número de especies (OTU) detectados mediante ADN ambiental.

DETECCIÓN DEL PEZ LEÓN EN EL PNA

El análisis de ADN ambiental también nos permitió evaluar la presencia del pez león (*Pterois volitans*), una especie exótica invasora en los mares mexicanos (Figura 24). Todos los registros del pez león con ADN ambiental fueron en sitios al este de Arrecife Alacranes, y aunque no se detectaron secuencias del pez león en el oeste de PNA, sí se observaron algunos individuos aislados durante los buceos SCUBA (Anexo 11). La relevancia que tiene esta información

está relacionada con la amenaza que significa esta especie invasora, originaria del Indo-Pacífico donde existen depredadores naturales que mantienen sus poblaciones reguladas; sin embargo, en los mares mexicanos es una especie que se ha reportado introducida desde hace más de una década y su número va en aumento, al carecer de depredadores naturales ha desplazado peces nativos [26, 27]. Cuenta con varias ventajas con las que otros peces no pueden competir, por ejemplo, espinas venenosas como defensa, una amplia dieta (incluyendo peces, camarones y cangrejos) y una reproducción muy exitosa desde temprana edad [28].



4. Conclusiones y recomendaciones

Estudiar la biodiversidad en un ecosistema marino no es tarea fácil; sin embargo, es más completo cuando se realiza con diferentes técnicas o metodologías para extraer la información de los sitios de interés, lo cual se confirmó con la expedición científica en Arrecife Alacranes, donde la suma de esfuerzos con diferentes técnicas brindó mayor información de los ecosistemas, las especies y el estado de conservación que guarda el PNAA.

La actualización del mapa de hábitats marinos permitió identificar que las estructuras coralinas bien conservadas han disminuido en los últimos 20 años, con un porcentaje de cambios positivos menor del 10 %. Además el índice de salud arrecifal coincide, señalando que el indicador que va en decremento es la cobertura de corales duros, es decir, el pilar que sostiene la función de los arrecifes coralinos se está viendo afectado y reducido por diferentes factores, algunos por influencia humana y otros por eventos naturales; sin embargo, es claro que es una llamada de atención para actuar en el fortalecimiento de acciones para la restauración y conservación de los corales duros del PNAA.

En general, la diversidad y biomasa de los peces en el PNAA se encon-



tró saludable, estando presentes especies claves como los peces cirujano y peces loro que promueven el establecimiento y permanencia de los corales formadores de los arrecifes coralinos. Además, en la mayoría de los sitios visitados se observaron juveniles de peces, lo que es un indicador de una buena función del ecosistema arrecifal como refugio y sitio de reproducción para los peces.

A partir de los datos científicos actualizados sobre la diversidad marina y su estado de conservación, se recomienda ampliar los límites de los polígonos de la zona núcleo para incluir a las áreas identificadas de alta importancia ecológica, lo que contribuirá a minimizar la exposición de estos sitios a los usos de extracción de recursos naturales que se realiza en la zona de amortiguamiento en donde se encuentran clasificados actualmente.

Por otra parte, con los datos recopilados en campo se identificaron sitios con estructuras coralinas de alta complejidad topográfica (rugosidad alta), lo que promueve una alta diversidad de especies al brindar gran cantidad de refugios y también alta biomasa de peces, lo que significa que son sitios de gran importancia en el mantenimiento de la biodiversidad del PNAA; sin embargo, al encontrarse fuera de las zonas núcleo son más vulnerables, por ejemplo el caso del sitio llamado Tweed.

Dentro de las amenazas para la conservación de la biodiversidad en Arrecife Alacranes, se registró la presencia del pez león tanto con técnicas moleculares como por censos visuales en varios de los sitios visitados. Esta especie introducida es altamente invasiva y desplaza a las especies nativas, por lo que es un foco rojo que hay que vigilar, además de promover su manejo para su control o erradicación del PNAA manteniendo un programa de monitoreo y captura constante a lo largo del año y estímulos a la pesca de ejemplares como parte de las actividades de turismo y pesca permitidas en la ANP.

Con el estudio de ADN ambiental en el PNAA se confirmó que aún hay especies, principalmente de los grupos poco estudiados, que se desconocen y son parte de la riqueza de Arrecife Alacranes. Así, al comparar la diversidad de especies reportadas en el Programa de Manejo del PNAA con las encontradas mediante el análisis del ADN ambiental se observó que es mucho mayor el número de especies detectadas con técnicas moleculares para la mayoría de los grupos (principalmente los menos estudiados) en contraste con los métodos tradicionales.

5. Referencias

- [1] Birkeland, R. (1997). *Life and death of coral reefs*. Chapman and Hall, Nueva York. 536 pp.
- [2] Reaka-Kudla, M. L. (1997). "The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rain forests," in *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Biological Resources*, eds M. L. Reaka-Kudla, D. E. Wilson, and E. O. Wilson. Washington, DC. Joseph Henry Press. 83–108.
- [3] ONU. (2018). Noticias ONU, 2018: El año internacional de los arrecifes de coral. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: <https://news.un.org/es/story/2018/01/1425331>
- [4] Romeu, E. (1995). El arrecife como recurso. *Biodiversitas* 3. Conabio. 8-13.
- [5] Modolon, F., Barno, A. R., Villela, H. D. M., y Peixoto, R. S. (2020). Ecological and biotechnological importance of secondary metabolites produced by coral-associated bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 129(6), 1441-1457.
- [6] Spalding, M., Burke, L., Wood, S. A., Ashpole, J., Hutchison, J., y Zu Ermgassen, P. (2017). Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *Marine Policy*, 82, 104-113.
- [7] Oceana. (2022). Informe Ejecutivo de la Expedición Científica de Oceana en México: Proyecto Alacranes. Biodiversidad de

los Ecosistemas en los Arrecifes Bajos del Norte y Arrecife Alacranes. México, 81 pp. DOI. 10.5281/zenodo.6519230

- [8] Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (2000). ACUERDO que tiene por objeto dotar con una categoría acorde con la legislación vigente a las superficies que fueron objeto de diversas declaratorias de áreas naturales protegidas emitidas por el Ejecutivo Federal. Diario Oficial de la Federación. 7 de junio de 2000. México
- [9] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2022). Ficha SIMEC: Arrecife Alacranes. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=61®=9>
- [10] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2006). Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Arrecife Alacranes. 1a Edición. Dirección General de Manejo para la Conservación. 165 pp.
- [11] LANRESC. (2021). Tarjeta de Reporte Arrecife Alacranes. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: https://www.lanresc.mx/publicaciones/tarjetas_reporte/tarjeta-de-reporte-arrecife-alacranes-2021/
- [12] Lang, J. C., Marks, K. W., Kramer, P. A., Kramer, P. R., & Ginsburg, R. N. (2012). PROTOCOLOS AGRRA VERSIÓN 5.5. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program. Florida. 1-44. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: <https://www.healthyreefs.org/cms/wp-content/uploads/2013/07/Protoc.-AGRRA-V5.5-FINAL-Espanol.pdf>
- [13] AGRRA. (2022). Benthos Indicators. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: <https://www.agrra.org/coral-reef-monitoring/benthos-indicator/>.
- [14] Froese, R. y Pauly, D. Editors. (2023). FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (02/2023).
- [15] McField, M., Kramer, P., Giró-Petersen A, Melina S, Drysdale I, Craig N, Ruedas M. (2020). Reporte del Arrecife Mesoamericano.
- [16] Schenk, T. (2005). *Introduction to Photogrammetry*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University. 79-95.



- [17] Habib, A.F., Kim, E.M., Kim, C.J. (2007). New methodologies for true orthophoto generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, 25-36.
- [18] Ferrari, R., McKinnon, D, He H, Smith RN, Corke P, González-Rivero M, Mumby PJ, Upcroft B. (2016). Quantifying multiscale habitat structural complexity: A cost-effective framework for underwater 3D modeling. *Remote Sensing*, 8 (2), 113.
- [19] Edwards, C. B., Eynaud, Y., Williams, G. J., Pedersen, N. E., Zgliczynski, B. J., Gleason, A. C. R., Smith, J. E., Sandin, S. A. (2017). Large-area imaging reveals biologically driven non-random spatial patterns of corals at a remote reef. *Coral Reefs*, 36, 1291-1305.
- [20] Pedersen, N. E., Edwards, C. B., Eynaud, Y., Gleason, A. C. R., Smith, J. E., Sandin, S. A. (2019). The influence of habitat and adults on the spatial distribution of juvenile corals. *Ecography*, 42, 1703-1713.
- [21] Kodera, S. M., Edwards, C. B., Petrovic, V., Pedersen N.E., Eynaud, Y. y Sandin, S. A. (2020). Quantifying life history demographics of the scleractinian coral genus Pocillopora at Palmyra Atoll. *Coral Reefs*, 39, 1091-1105.
- [22] Ferrari, R., Lachs, L., Pygas, D.R., Humanes, A., Sommer, B., Figueira, W. F., Edwards, A. J., Bythell, J. C., Guest, J. R. (2021). Photogrammetry



as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends in Ecology and Evolution*, 36, 1093–1101.

- [23] Suka, R., Asbury, M., Couch, C. S., Gray, A. E., Winston, M., Oliver, T. (2019). Processing Photomosaic Imagery of Coral Reefs Using Structure-from-Motion Standard Operating. Procedures, 1–54.
- [24] Sandin, S., Smith, J., Brian, Z. (2021). The Scripps Oceanography 100 Island Challenge. Recuperado el 23 de enero de 2023 de: <https://100islandchallenge.org>
- [25] Bakker, J., Wangensteen, O. S., Baillie, C., Buddo, D., Chapman, D. D., Gallagher, T. L., Guttridge, A. J., Hertler, H., Mariani, S. (2019). Biodiversity assessment of tropical shelf eukaryotic communities via pelagic edna metabarcoding. *Ecology and Evolution*, 9:14341–14355.10.1002/ece3.5871
- [26] Valdivia-Carrillo, T., Rocha-Olivares, A., Reyes-Bonilla, H., Dominguez-Contreras, J.F. y. Munguia-Vega, A. (2021). Integrating edna metabarcoding and simultaneous underwater visual surveys to describe complex fish communities in a marine biodiversity hotspot. *Molecular Ecology Resources*, 21, 1558–1574.10.1111/1755-0998.13375
- [27] Huson, D. H., S. Beier, I. Flade, A. Gorska, M. El-Hadidi, S. Mitra, H. J. Ruscheweyh, R. Tappu. (2016). Megan community edition - Interactive exploration and analysis of large-scale microbiome sequencing data. *PLoS Computational Biology*, 12:e1004957.10.1371/journal.pcbi.1004957
- [28] Arias-González, J. E., González-Gándara, C., Cabrera, J. L., Christensen, V. (2011). Predicted impact of the invasive lionfish *Pterois volitans* on the food web of a Caribbean coral reef. *Environmental Research*, 111, 917–925.
- [29] Aguilar-Perera, A. y Tuz-Sulub, A. (2010). Non-native, invasive red lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus, 1758]: Scorpaenidae), is first recorded in the southern Gulf of Mexico, off the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Aquatic Invasions*, 5:S9–S12, doi:10.3391/ai.2010.5.S1.003
- [30] Villaseñor Derbez, J. C. (2020). El pez león: invasor en el Caribe Mexicano. *Biodiversitas*, 149. Conabio. 1–6.



6. Tripulación en la Expedición Científica

STAFF OCEANA

Mariana Berenice Reyna Fabián, líder de la expedición.
Miguel Rivas Soto, director de Santuarios Marinos.
Edith Martínez Ramos, gerente de Comunicación.

INVESTIGADORAS E INVESTIGADORES

M. en C. Gabriel Cervantes Campero, Kalambio A.C.
Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.
M. en C. Yoalli Quetzalli Hernández Díaz, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.
Dr. Alfonso Medellín Ortiz, Investigador en Pesquerías.
M. en C. Antar Mijail Pérez Botello, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.
Dr. Adrián Munguía Vega, Investigador en Genómica.
Dra. Ángela María Randazzo Eisemann, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.

SUPERVISIÓN ACTIVIDADES DE BUCEO

Laura Ivonne Martín Pérez.
Gerardo Cosgaya Sosa.

FOTOGRAFÍA Y VIDEO

Juan Carlos Bonilla Escotto, Isla Laboratorio Digital.
Raymundo Rosales Guerrero, Isla Laboratorio Digital.



7. Agradecimientos

Agradecemos a la Fundación Blancpain por su valiosa contribución para la realización de la Expedición Científica de Oceana en México en el marco del Proyecto Alacranes. Y la contribución de las fundaciones SOBRATO y WYSS para la campaña de Santuarios Marinos de Oceana.

Un especial agradecimiento por la colaboración y apoyo que nos brindó la dirección del Parque Nacional Arrecife Alacranes de la CONANP: Biol. Cristóbal Enrique Cáceres G. Cantón, director; M.C. Brenda Hernández Hernández, subdirectora, y M.C. Simei Marisol Campos Bobadilla, analista, por su asesoría, logística, trámites y permisos para la realización de este proyecto.

Agradecemos a la Secretaría de Pesca y Acuicultura Sustentables de Yucatán (SEPASY) por las facilidades que brindaron para la realización del trabajo de campo: Lic. Rafael Combaluzier Medina, secretario de Pesca y Acuicultura Sustentables; Lic. José Arturo Milán Alonso, director de Desarrollo Sustentable y Proyectos Estratégicos, y al Lic. Rolando de Atocha Meneses Acevedo, líder de proyecto. También un agradecimiento especial al personal de guardaparques asignado al Parque Nacional Arrecife Alacranes: Astrid Daniela Santana Cisneros, Daniel Aguirre Ayala, David Jesús González Vásquez, Efraim Candila Tuyub, Pedro Luis Díaz Carballido, René Salinas Salazar.

También agradecemos al personal de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, particularmente a los fareros Sostenes Pérez y Manolo Lora, por las facilidades prestadas en Isla Pérez. Un agradecimiento también a Aarón Díaz y al Dr. Armin Tuz por el apoyo logístico en Isla Pérez.

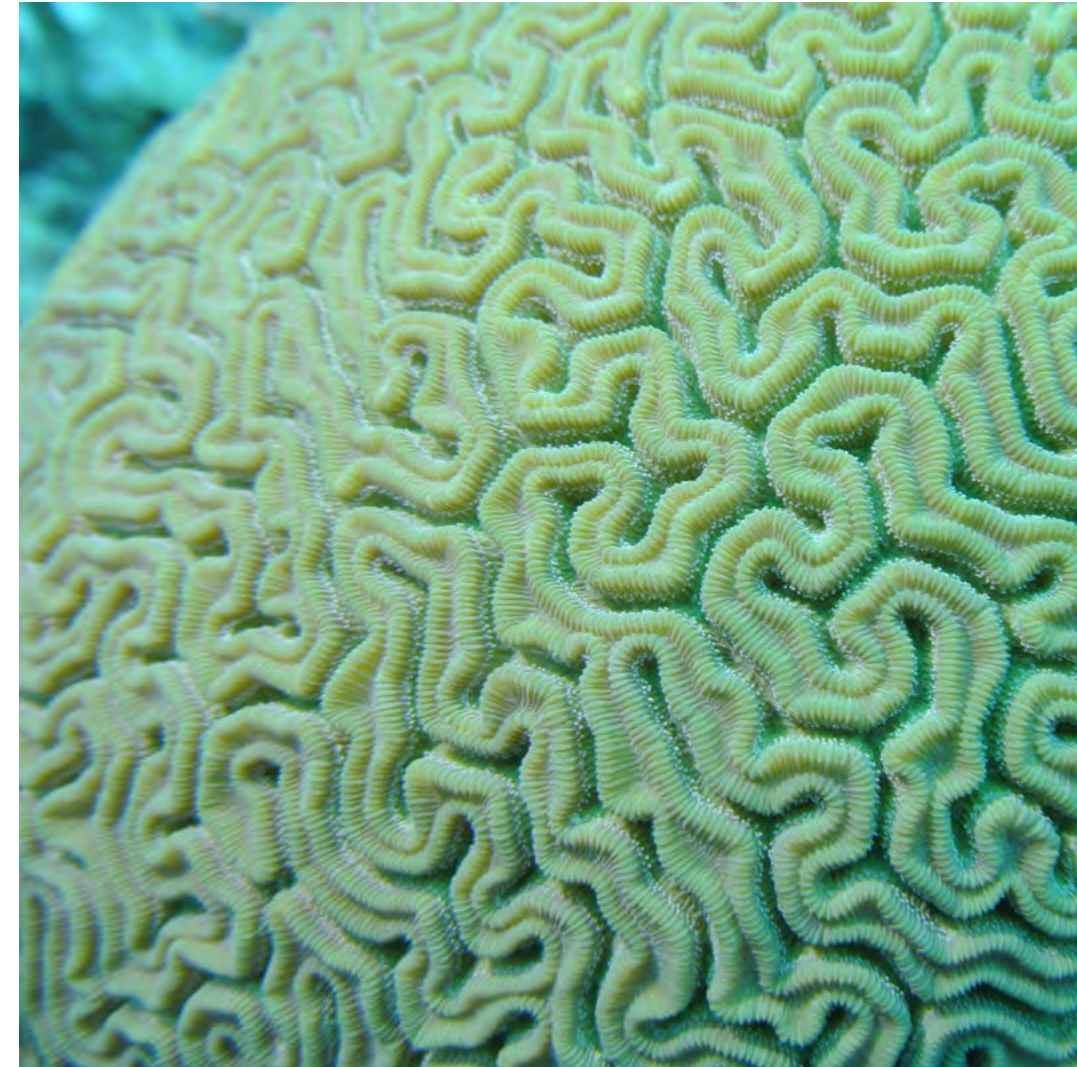
Agradecemos al personal de la UNAM, campus Sisal, por la disposición y acuerdos de colaboración logrados, así como quienes participaron en la colecta de datos *in situ* en el transcurso del 2022: M.C. Ana Molina y Lic. Ernesto Hevia.

Agradecemos a todo el equipo del Sandin's Lab a cargo del Dr. Stuart Sandin del Scripps Institution of Oceanography, por la capacitación y el uso de softwares para el análisis de fotogrametría y la generación de mapas 3D.

Muchas gracias a todas y todos los investigadores que dedicaron su tiempo en campo y laboratorio para darnos a conocer más sobre la gran biodiversidad de los océanos en México. Así como por sus aportes fotográficos para este reporte.

Agradecemos el tiempo y dedicación a las y los camarógrafos y periodistas que han seguido el trabajo del Proyecto Alacranes para difundir la importancia de la conservación de los arrecifes en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Agradecemos las atenciones por parte del personal de la embarcación Caribbean Kraken donde se realizaron los traslados a los sitios de estudio.



8. Anexos

Anexo 1. Sitios de muestreo en el PNAA

Información de los sitios monitoreados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes en 2022.

Los sitios que fueron a la par en todas las demás investigaciones fueron: CA= cerca del arco, GD=Gorgonia Delfín, HO= Hongos, IN= Interior Nuevo, M= Marisol, PN= Pendiente Norte, y TW= Tweed.

ZONA DE MANEJO	SITIO	ZONA UTM	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD PROMEDIO (m)
1	AP15		220817	2499294	1.4
2	BV11		218066	2482035	9.6
3	GD		217896	2482786	5.9
4	IIM14		218515	2482439	4.4
5	IIM15		218626	2482973	4.5
6	IIM16		218131	2483514	3.9
7	IIM3		225678	2477513	1.1
8	IIM3b		225644	2477519	1.5
9	IIM4		224924	2478416	2.1
10	IIM5		224471	2478680	1.2
11	IN		219231	2483478	2.0
12	SR18		219133	2488511	2.0
13	SR19		219147	2489725	2.1
14	SR20		216076	2491539	2.7
15	SR21		215690	2492996	1.6
16	SR22		216733	2492932	2.0
17	SR34		229270	2486225	1.5
18	SR35	16Q	228086	2485930	2.2
19	SR36		227489	2486083	1.5
20	SR37		226735	2486447	0.7
21	SR38		227243	2486854	1.4
22	SR39		227015	2487273	0.8
23	SR40		226583	2487671	1.0
24	SR47		220024	2482950	2.1
25	SR50		225691	2478054	6.5
26	SR50b		225702	2478063	6.0
27	SVE6		231707	2484483	15.7
28	SVE7		231643	2485744	13.4
29	SVE8		231639	2483204	16.2
30	TW		226340	2495702	6.0
31	BV1		215903	2499671	7.5
32	BV10		216154	2484741	8.0
33	BV2	Zona núcleo norte	215123	2498881	10.8
34	BV3		213444	2496353	8.3
35	BV6		213226	2490305	12.3

ZONA DE MANEJO	SITIO	ZONA UTM	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD PROMEDIO (m)
36	BV7		213784	2489689	18.9
37	BV8		215062	2488446	8.9
38	BV9		215317	2486913	9.6
39	CA		216867	2500161	6.8
40	EX3		217040	2493248	2.5
41	IIM17	Zona núcleo norte	217281	2484033	4.0
42	IIM18		217415	2484360	1.3
43	IIM19		216615	2484932	1.2
44	IIM20		216056	2485694	5.2
45	IIM21		215815	2486291	5.6
46	IIM22		216577	2486761	4.2
47	IIM23		217047	2487193	4.0
48	IIM24		215815	2487726	5.8
49	IIM25		216463	2488958	4.0
50	IIM35		213161	2494406	3.2
51	IIM37		215371	2496375	2.4
52	IIM38		216285	2497073	2.0
53	IIM39		216336	2498013	2.3
54	IIM40		217072	2498991	3.5
55	IIM41		215650	2494952	1.6
56	IIM42		216247	2495879	1.4
57	IIM44		216026	2489929	4.5
58	MA	Zona núcleo norte	212837	2490852	11.2
59	PN	16Q	216253	2484750	6.6
60	SR24		216804	2494353	1.5
61	SR25		219018	2492482	0.9
62	SR30		218218	2494025	1.2
63	SR31		217533	2495182	1.2
64	SR32		218290	2495582	1.3
65	SR41		219695	2497062	1.1
66	SR42		219226	2496560	0.8

ZONA DE MANEJO	SITIO	ZONA UTM	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD PROMEDIO (m)
67	SR43		219086	2496074	1.3
68	SR44		218592	2496551	1.1
69	SR45		218550	2497334	1.1
70	SR46		218517	2497910	0.5
71	SR49		217052	2491622	2.6
72	SR51		219505	2496015	1.2
73	SR52		218827	2497069	5.1
74	SVE13		225093	2497231	10.7
75	SVE14		223355	2498271	9.2
76	SVE15		220817	2499294	11.0
77	SVE16		218746	2499746	6.8
78	Zona núcleo sur	AP1	227001	2476051	0.5
79		AP2	227767	2476601	0.5
80		AP3	228437	2477249	0.7
81		AP4	228848	2477860	0.8
82		AP5	229008	2478508	0.9
83		AP6	229430	2479310	0.7
84		AP7	229726	2480131	0.8
85		AP8	230239	2481107	0.6
86		BV14	222320	2477723	8.4
87		EX1	226884	2476335	1.2
88		EX2	228106	2480234	0.8
89		HO	221412	2479165	16.4
90		IIM10	221094	2481317	4.1
91		IIM11	220051	2481994	1.2
92		IIM12	219298	2481839	1.7
93		IIM13	218962	2482018	5.0
94		IIM6	223737	2479120	2.0
95		IIM7	223088	2478929	1.3
96		IIM8	221828	2480025	3.7
97		IIM9	221028	2480582	5.8
98		SR1	223094	2481365	1.3
99		SR2	223734	2481741	0.8
100		SR3	224210	2481976	1.4

ZONA DE MANEJO	SITIO	ZONA UTM	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD PROMEDIO (m)
101		SR33	230310	2486472	0.9
102		SR4	224435	2481426	3.9
103		SR5	223717	2480973	2.9
104		SR6	222282	2481342	2.2
105		SR7	221812	2481718	2.8
106	Zona núcleo sur	SR8	222451	2482201	2.3
107		SR9	222976	2482675	1.2
108		SVE1	226889	2475320	14.7
109		SVE2	227884	2475753	18.9
110		SVE3	228527	2476400	17.1
111		SVE4	229043	2477010	17.2

Anexo 2. Listado de corales del Orden Scleractinia

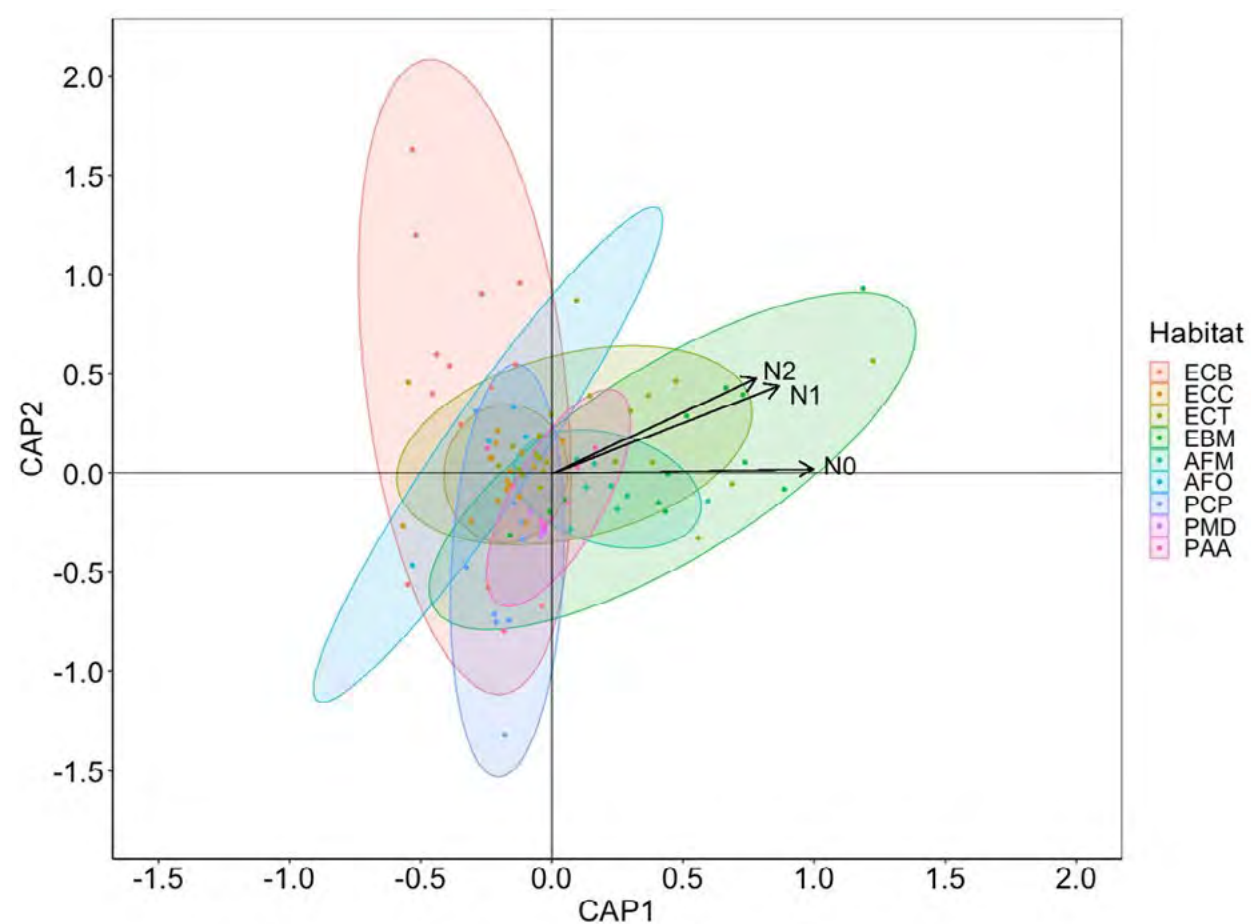
Registro de los corales duros en Arrecife Alacranes, en el Programa de Manejo (PM), y las expediciones científicas de Oceana en los años 2021, 2022 con video-transectos, 2022 con Fotogrametría (FT). Categoría en la NOM-059-SEMARNAT-2010, A: Amenazada, Pr: Sujeta protección especial. Categoría en la lista roja de la UICN, CR: En Peligro Crítico, EN: En Peligro VU: Vulnerable, NT: Casi Amenazado, CITES: indica que se encuentran dentro del Apéndice II. En negritas todas las especies registradas en la expedición científica 2022. Los nuevos registros potenciales de corales duros para el PNAA están señalados con * junto al nombre científico.

FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE	CATEGORÍA DE RIESGO
1	<i>Acropora cervicornis</i>	PM, OCEANA 2022,	Pr, CR
2	<i>Acropora palmata</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	Pr, CR
3	<i>Acropora prolifera</i>	PM, OCEANA 2022	
4	<i>Agaricia agaricites</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	VU
5	<i>Agaricia fragilis</i> *	OCEANA 2022	
6	<i>Agaricia humilis</i>	FT	CR, CITES
7	<i>Agaricia lamarcki</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	CR
8	<i>Agaricia tenuifolia</i> *	OCEANA 2022	CR
9	<i>Hellioseris cucullata</i>	PM, OCEANA 2022	
10	<i>Stephanocoenia intersepta</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	NT
11	<i>Cladocora arbuscula</i>	PM	
12	<i>Favia fragum</i>	PM, OCEANA 2022	
13	<i>Manicina areolata</i>	PM, OCEANA 2022, FT	
14	<i>Dichocoenia stokesi</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	VU
15	<i>Eusmilia fastigiata</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	CR
16	<i>Meandrina meandrites</i>	PM, OCEANA 2021, 2022	CR
17	<i>Montastraea cavernosa</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	

FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE	CATEGORÍA DE RIESGO
18	<i>Orbicella annularis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	A, EN
19	<i>Orbicella faveolata</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	A, EN
20	<i>Orbicella franksi</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	NT
21	<i>Colpophyllia natans</i>	PM, OCEANA 2021, 2022	VU
22	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	CR
23	<i>Isophyllia sinuosa</i>	PM	
24	<i>Mussa angulosa</i>	PM	NT
25	<i>Mycetophyllia aliciae</i>	OCEANA 2021	
26	<i>Mycetophyllia ferox</i>	OCEANA 2021, 2022	CR
27	<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	PM, OCEANA 2022	
28	<i>Pseudodiploria clivosa</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	NT
29	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	CR
30	<i>Scolymia lacera</i>	PM	CR
31	<i>Oculina diffusa</i>	PM	
32	<i>Madracis decactis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022	CR
33	<i>Porites astreoides</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	
34	<i>Porites furcata</i> *	OCEANA 2022	
35	<i>Porites porites</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	
36	<i>Astrangia solitaria</i>	PM	
37	<i>Siderastrea siderea</i>	OCEANA 2021, 2022, FT	CR
38	<i>Siderastrea radians</i>	PM, OCEANA 2021, 2022, FT	
39	<i>Solenastrea bournoni</i>	FT	

Anexo 3. Análisis de la abundancia de corales

Se realizó el análisis canónico de coordenadas principales de la abundancia de especies de coral en función de los nueve hábitats marinos identificados para el Parque Nacional Arrecife Alacranes en 2022. Las siglas significan: ECB: estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC: estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT: estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM: estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM: arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO: arrecife frontal con dominancia de octocorales (corales blandos), PCP: parches de corales y pastos marinos, PMD: pasto marino denso y PAA: planicies de arena y algas. Los números de diversidad de Hill, donde N0 es la riqueza de las especies de coral, N1 es el índice exponencial de Shannon y N2 el índice inverso de Simpson, que se proyectaron en el espacio multidimensional.



Anexo 4. Listado de especies de peces registrados en el PNA

Listado de especies de peces registrados en Arrecife Alacranes, en el Programa de Manejo (PM), la campaña del CINVESTAV (CV), Expedición Oceana en mayo, julio y agosto 2022 (OCEANA, 2022), Expedición Oceana video transectos en 8 sitios (+). Especies de interés comercial (*). Los nuevos registros potenciales de peces para el PNA están señalados con ⊕ junto al nombre científico.

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
1	Chondrichtios	<i>Carcharhinus falciformis</i>	PM
2		<i>Carcharhinus leucas</i>	PM
3		<i>Carcharhinus limbatus</i>	PM
4		<i>Carcharhinus perezi</i>	PM
5		<i>Carcharhinus plumbeus</i>	PM
6	Ginglymostomatidae	<i>Ginglymostoma cirratum</i>	PM
7	Dasyatidae	<i>Dasyatis americana</i>	CV, PM, OCEANA 2022
8		<i>Dasyatis sabina</i>	PM
9	Mobulidae	<i>Manta birostris</i>	PM
10	Myliobatidae	<i>Aetobatus narinari</i>	PM, OCEANA 2022
11	Narcinidae	<i>Narcine brasiliensis</i>	PM
12	Rhinobatidae	<i>Pseudobatos lentiginosus</i>	PM
13	Urotrygonidae	<i>Urolophus jamaicensis</i>	CV, PM
14	Osteictios	<i>Acanthurus chirurgus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, ⊕
15		<i>Acanthurus coeruleus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, ⊕
16		<i>Acanthurus tractus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, ⊕
17	Apogonidae	<i>Apogon maculatus</i>	PM,
18		<i>Astrapogon stellatus</i>	PM
19	Atherinidae	<i>Hypoatherina harringtonensis</i>	CV, OCEANA 2022

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
20	Aulostomidae	<i>Aulostomus maculatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
21	Balistidae	<i>Balistes vetula</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
22		<i>Canthidermis sufflamen</i>	CV, PM, OCEANA 2022
23		<i>Melichthys niger</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
24	Batrachoididae	<i>Opsanus pardus</i>	PM
25	Belonidae	<i>Strongylura marina</i>	PM
26		<i>Strongylura notata</i>	PM
27	Blenniidae	<i>Entomacrodus nigricans</i> ⊙	+
28		<i>Hypoleurochilus bermudensis</i>	PM
29		<i>Ophioblennius atlanticus</i>	CV
30		<i>Ophioblennius macclurei</i>	PM
31		<i>Parablennius marmoreus</i>	PM
32	Carangidae	<i>Alectis ciliaris</i>	PM
33		<i>Caranx bartholomaei</i>	PM
34		<i>Caranx crysos</i>	CV
35		<i>Caranx hippos</i>	PM, OCEANA 2022
36		<i>Caranx latus</i> ⊙	OCEANA 2022

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
37	Carangidae	<i>Caranx ruber</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
38		<i>Seriola rivoliana</i>	PM
39		<i>Trachinotus carolinus</i>	PM
40		<i>Trachinotus goodei</i>	PM
41	Chaenopsidae	<i>Chaenopsis ocellata</i>	PM
42		<i>Emblemaria pandionis</i>	PM
43		<i>Emblemariopsis bahamensis</i>	PM

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
44	Chaetodontidae	<i>Hemiemblemaria simula</i>	PM, OCEANA 2022
45		<i>Lucayablennius zingaro</i> ⊙	OCEANA 2022
46		<i>Chaetodon capistratus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
47		<i>Chaetodon ocellatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
48		<i>Chaetodon sedentarius</i>	CV, PM, +
49		<i>Chaetodon striatus</i>	PM, OCEANA 2022
50	Cirrhitidae	<i>Amblycirritus pinos</i>	PM
51	Clupeidae	<i>Harengula clupeola</i>	PM
52	Diodontidae	<i>Chilomycterus antennatus</i> ⊙	OCEANA 2022
53		<i>Diodon holocanthus</i>	CV, OCEANA 2022
54		<i>Diodon hystrix</i>	CV, PM, OCEANA 2022
55	Echeneidae	<i>Echeneis neucratoides</i>	PM
56	Engraulinae	<i>Anchoa lamprotaenua</i>	PM
57	Gerreidae	<i>Eucinostomus jonesi</i>	PM
58		<i>Gerres cinereus</i>	PM
59		<i>Ulaema lefroyi</i>	PM
60	Gobiidae	<i>Coryphopterus dicrus</i>	PM
61		<i>Coryphopterus eidolon</i>	PM, OCEANA 2022
62		<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	PM, OCEANA 2022
63		<i>Coryphopterus hyalinus</i>	PM, OCEANA 2022
64		<i>Elacatinus oceanops</i>	PM, OCEANA 2022, +
65		<i>Elacatinus xanthiprora</i>	PM
66		<i>Gnatholepis thompsoni</i> ⊙	OCEANA 2022, +
67		<i>Microgobius carri</i>	PM
68		<i>Ptereleotris calliura</i>	CV, PM
69		<i>Ptereleotris helenae</i>	CV, PM

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
70	Grammatidae	<i>Gramma loreto</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
71		<i>Anisotremus surinamensis</i>	PM
72		<i>Anisotremus virginicus</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
73		<i>Haemulon album</i>	PM
74		<i>Haemulon aurolineatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022
75		<i>Haemulon carbonarium</i>	CV, PM, OCEANA 2022
76		<i>Haemulon chrysargyreum</i>	CV, PM, OCEANA 2022
77	Haemulidae	<i>Haemulon flavolineatum</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
78		<i>Haemulon melanurum</i>	CV, PM, OCEANA 2022
79		<i>Haemulon parra</i>	PM
80		<i>Haemulon plumierii</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
81		<i>Haemulon sciurus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
82		<i>Haemulon vittatum</i>	CV, PM
83	Hemiramphidae	<i>Hemiramphus brasiliensis</i>	PM
84		<i>Holocentrus adscensionis</i>	CV, PM, OCEANA 2022
85	Holocentridae	<i>Holocentrus rufus</i>	CV, PM, +
86		<i>Myripristis jacobus</i>	PM
87		<i>Sargocentron vexillarium</i>	CV, PM
88	Kyphosidae	<i>Kyphosus sectatrix</i>	+

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
88		<i>Kyphosus spp.</i>	CV, PM, OCEANA 2022
89	Labridae	<i>Bodianus pulchellus</i>	PM
90		<i>Bodianus rufus</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
91		<i>Clepticus parrae</i>	CV, OCEANA 2022, +
92		<i>Halichoeres bivittatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
93		<i>Halichoeres caudalis</i> ☉	OCEANA 2022, +
94		<i>Halichoeres garnoti</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
95		<i>Halichoeres maculipinna</i>	CV, PM, OCEANA 2022
96		<i>Halichoeres pictus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
97		<i>Halichoeres poeyi</i>	PM, OCEANA 2022
98	Labridae	<i>Halichoeres radiatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
99		<i>Lachnolaimus maximus</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
100	Osteictios	<i>Thalassoma bifasciatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
101		<i>Xyrichtys martinicensis</i>	PM
102		<i>Xyrichtys novacula</i>	PM
103		<i>Xyrichtys splendens</i>	CV
104		<i>Gobioclinus filamentosus</i>	PM
105		<i>Labrisomus gobio</i>	PM, +
106		<i>Labrisomus nuchipinnis</i>	PM
107	Labrisomidae	<i>Malacoctenus macropus</i> ☉	OCEANA 2022
108		<i>Malacoctenus triangulatus</i>	PM, OCEANA 2022
109		<i>Malacoctenus versicolor</i>	PM
110		<i>Lutjanus analis</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
111	Lutjanidae	<i>Lutjanus apodus</i>	PM, OCEANA 2022
112		<i>Lutjanus buccanella</i> ☉	OCEANA 2022

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
113		<i>Lutjanus griseus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
114		<i>Lutjanus jocu</i> ☉	OCEANA 2022
115		<i>Lutjanus mahogoni</i>	PM
116		<i>Lutjanus synagris</i>	CV, PM
117		<i>Ocyurus chrysurus</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
118		<i>Rhomboplites aurorubens</i>	PM
119	Malacanthidae	<i>Malacanthus plumieri</i>	PM, OCEANA 2022
120		<i>Aluterus schoepfi</i>	PM
121		<i>Aluterus scriptus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
122	Monacanthidae	<i>Cantherhines macrocerus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
123		<i>Cantherhines pullus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
124		<i>Monacanthus tuckeri</i>	CV, OCEANA 2022
125		<i>Mulloidichthys martinicus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
126	Mullidae	<i>Pseudupeneus maculatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
127	Muraenidae	<i>Gymnothorax funebris</i>	PM, +
128		<i>Gymnothorax miliaris</i>	PM
129		<i>Gymnothorax moringa</i>	CV, PM
130		<i>Gymnothorax vicinus</i>	PM
131	Ogcocephalidae	<i>Ogcocephalus radiatus</i>	PM
132	Opistognathidae	<i>Opistognathus aurifrons</i>	CV, PM, OCEANA 2022
133		<i>Opistognathus macrog-nathus</i>	PM
134		<i>Acanthostracion polygonia</i>	PM, OCEANA 2022
135	Ostraciidae	<i>Acanthostracion quadricornis</i>	PM

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
136		<i>Lactophrys bicaudalis</i>	CV, PM
137		<i>Lactophrys trigonus</i>	PM
138		<i>Lactophrys triqueter</i>	CV, PM, OCEANA 2022
139	Pempheridae	<i>Pempheris schomburgky</i>	PM
140		<i>Centropyge argi</i>	PM, OCEANA 2022
141		<i>Holacanthus bermudensis</i>	CV, OCEANA 2022, +
142		<i>Holacanthus ciliaris</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
143		<i>Holacanthus tricolor</i>	PM
144		<i>Pomacanthus arcuatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
145		<i>Pomacanthus paru</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
146		<i>Abudefduf saxatilis</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
147		<i>Chromis cyanea</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
148		<i>Chromis enchrysurus</i>	PM
149	Osteictios	<i>Chromis insolata</i>	CV
150		<i>Chromis multilineata</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
151	Pomacentridae	<i>Chromis scotti</i>	CV, PM, OCEANA 2022
152		<i>Microspathodon chrysurus</i>	CV, PM, OCEANA 2022

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
153		<i>Neopomacentrus cyanomos</i> ☉	OCEANA 2022
154		<i>Stegastes adustus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
155		<i>Stegastes diencaeus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
156		<i>Stegastes leucostictus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
157		<i>Stegastes partitus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
158		<i>Stegastes planifrons</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
159		<i>Stegastes variabilis</i>	CV, +
160	Priacanthidae	<i>Heteropriacanthus cruentatus</i>	PM
161	Rachycentridae	<i>Rachycentron canadum</i>	PM
162		<i>Cryptotomus roseus</i>	CV, PM
163		<i>Scarus coelestinus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
164		<i>Scarus coeruleus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
165		<i>Scarus guacamaia</i>	CV, PM, OCEANA 2022
166	Scaridae	<i>Scarus iseri</i>	CV, PM, OCEANA 2022
167		<i>Scarus taeniopterus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
168		<i>Scarus vetula</i>	CV, PM, OCEANA 2022
169		<i>Sparisoma atomarium</i>	CV, PM, OCEANA 2022

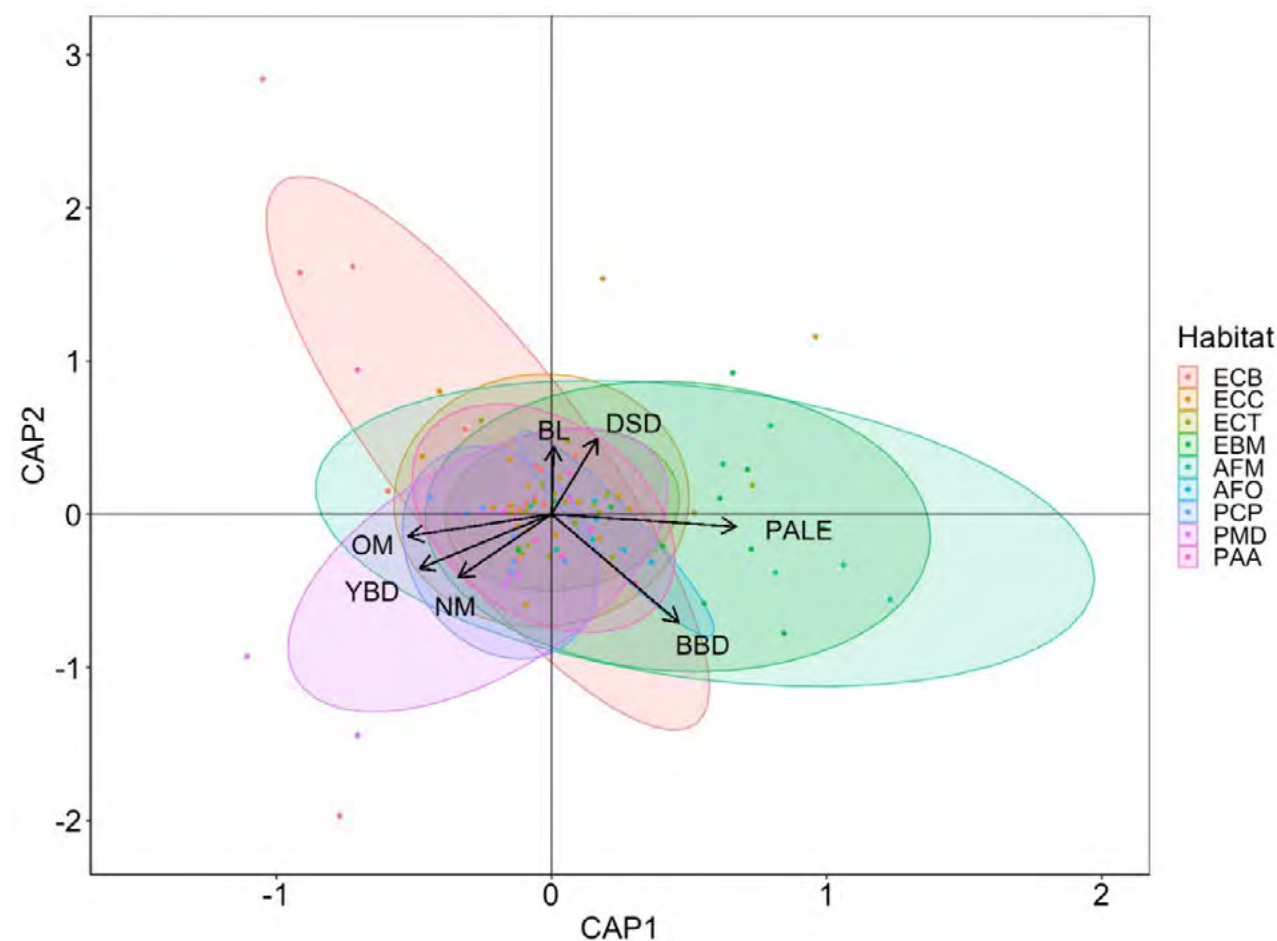
CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
170		<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
171		<i>Sparisoma chrysopterus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
172		<i>Sparisoma radians</i>	CV, PM
173		<i>Sparisoma rubripinne</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
174		<i>Sparisoma viride</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
175		<i>Equetus punctatus</i>	PM, OCEANA 2022
176	Scianidae	<i>Equetus umbrosus</i>	PM
177		<i>Pareques acuminatus</i>	PM
178		<i>Odontoscion dentex</i>	PM
179	Scombridae	<i>Auxis thazard</i>	PM
180		<i>Scomberomorus regalis</i>	CV, PM
181		<i>Pterois volitans</i>	+
182	Scorpaenidae	<i>Pterois spp.</i>	OCEANA 2022
183		<i>Scorpaena plumieri</i>	CV, PM
184		<i>Diplectrum formosum</i>	PM
185		<i>Cephalopholis cruentata</i>	CV, PM, OCEANA 2022
186		<i>Cephalopholis fulva</i> ☉	OCEANA 2022
187	Serranidae	<i>Epinephelus adscensionis</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
188		<i>Epinephelus guttatus</i>	CV, PM
189		<i>Epinephelus itjara</i>	PM
190		<i>Epinephelus morio</i>	CV, PM, OCEANA 2022

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
191		<i>Epinephelus striatus</i>	CV, OCEANA 2022
192		<i>Hypoplectrus aberrans</i>	PM
193		<i>Hypoplectrus chlorurus</i>	CV, OCEANA 2022
194		<i>Hypoplectrus gemma</i>	CV
195		<i>Hypoplectrus guttavarius</i>	CV, PM
196		<i>Hypoplectrus indigo</i>	CV, PM, OCEANA 2022
197		<i>Hypoplectrus nigricans</i>	CV, PM
198		<i>Hypoplectrus puella</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
199		<i>Hypoplectrus unicolor</i>	CV, PM
200		<i>Mycteroperca bonaci</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
201		<i>Mycteroperca interstitialis</i>	CV, PM, OCEANA 2022
202		<i>Mycteroperca tigris</i>	CV, PM, OCEANA 2022
203		<i>Mycteroperca venenosa</i>	CV, PM, OCEANA 2022
204		<i>Paranthias furcifer</i>	CV, PM
205		<i>Rypticus saponaceu</i> *	PM, +
206	Osteictios	<i>Serranus baldwini</i>	CV, PM
207		<i>Serranus tabacarius</i>	CV, PM, OCEANA 2022
208		<i>Serranus tigrinus</i>	CV, PM, OCEANA 2022, +
209		<i>Serranus tortugarum</i>	CV, PM
210		<i>Archosargus rhomboidalis</i>	PM

CLASE	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FUENTE
211		<i>Calamus bajonado</i>	CV, PM, OCEANA 2022
212		<i>Calamus calamus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
213		<i>Calamus nodosus</i> * ⊙	+
214		<i>Calamus penna</i>	CV, PM
215		<i>Calamus pennatula</i>	CV, PM, OCEANA 2022
216		<i>Calamus proridens</i>	CV, PM
217	Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i> *	CV, PM, OCEANA 2022, +
218		<i>Sphyraena picudilla</i>	PM
219	Spratelloididae	<i>Jenkinsia lamprotaenia</i>	PM
220		<i>Jenkinsia majua</i>	PM
221	Synodontidae	<i>Synodus intermedius</i>	CV, PM
222		<i>Synodus saurus</i>	CV
223	Tetraodontidae	<i>Canthigaster rostrata</i>	CV, PM, OCEANA 2022
224		<i>Sphoeroides spengleri</i>	CV, PM, OCEANA 2022
225	Tripterygiinae	<i>Enneanectes jordani</i>	PM
226	Elasmobranchii	<i>Aetobatus narinari</i> *	+

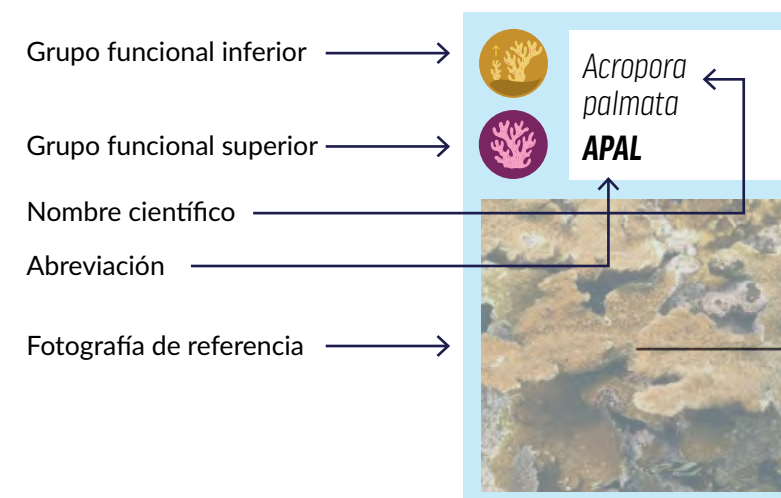
Anexo 5. Análisis del estado de salud de los corales duros

Se muestra el análisis de coordenadas principales del estado de salud de los corales en relación con los nueve hábitats marinos encontrados en 2022 en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. Las abreviaturas son: PALE: palidez, BL: blanqueamiento, YBD: banda amarilla, BBD: banda negra, DSD: porcentaje puntos oscuros, NM: mortalidad reciente y OM: mortalidad antigua. ECB: estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC: estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT: estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM: estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM: arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO: arrecife frontal con dominancia de octocorales (corales blandos), PCP: parches de corales y pastos marinos, PMD: pasto marino denso y PAA: planicies de arena y algas.



Anexo 6. Catálogo de algunas especies de corales duros del PNAA

Se muestran imágenes de 20 especies de corales duros registradas con fotogrametría en el Parque Nacional Arrecife Alacranes, así como la información de las agrupaciones a las que se asocian, el nombre científico y la abreviatura según el Protocolo AGRRA.



GRUPOS FUNCIONALES INFERIORES



GRUPOS FUNCIONALES SUPERIORES

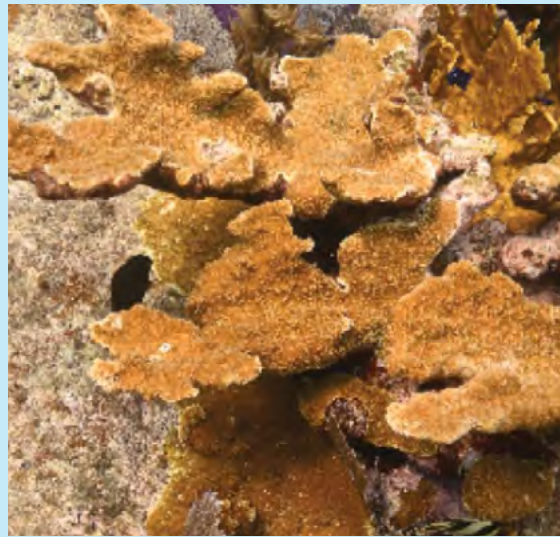




*Acropora
palmata*



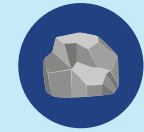
APAL



*Agaricia
agaricites*



AAGA



*Dichocoenia
stokesi*



DSTO



*Diploria
labyrinthiformis*



DLAB



*Acropora
humilis*



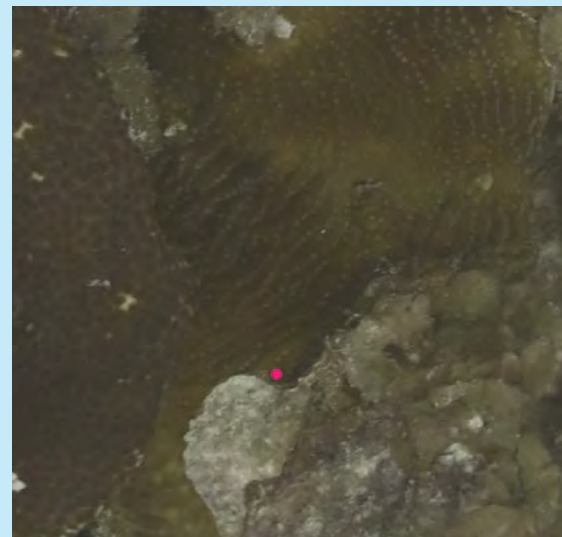
AHUM



*Agaricia
lamarcki*



ALAM



*Eusmilia
fastigiata*



EFAS



*Montastraea
cavernosa*



MCAV





*Orbicella
annularis*



OANN



*Orbicella
faveolata*



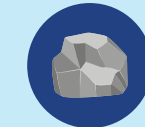
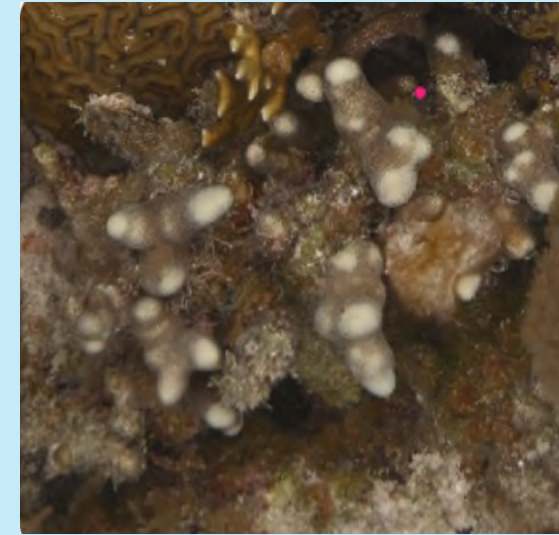
OFAV



*Porites
porites*



PPOR



*Pseudodiploria
clivosa*



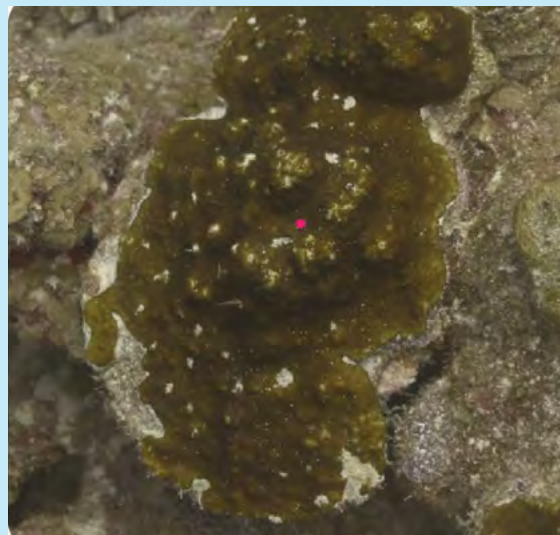
OFAV



*Orbicella
franksi*



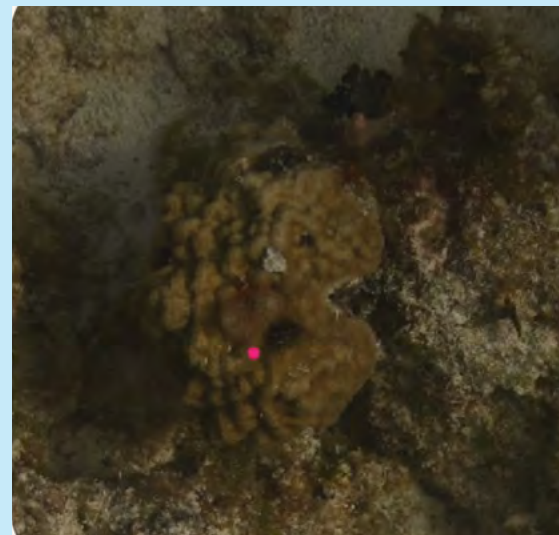
OFRA



*Porites
astreoides*



PAST



*Pseudodiploria
strigosa*



PSTR



*Siderastrea
radians*



SRAD






*Sideastrea
siderea*

SSID






*Solenastrea
bournoni*

SBOU





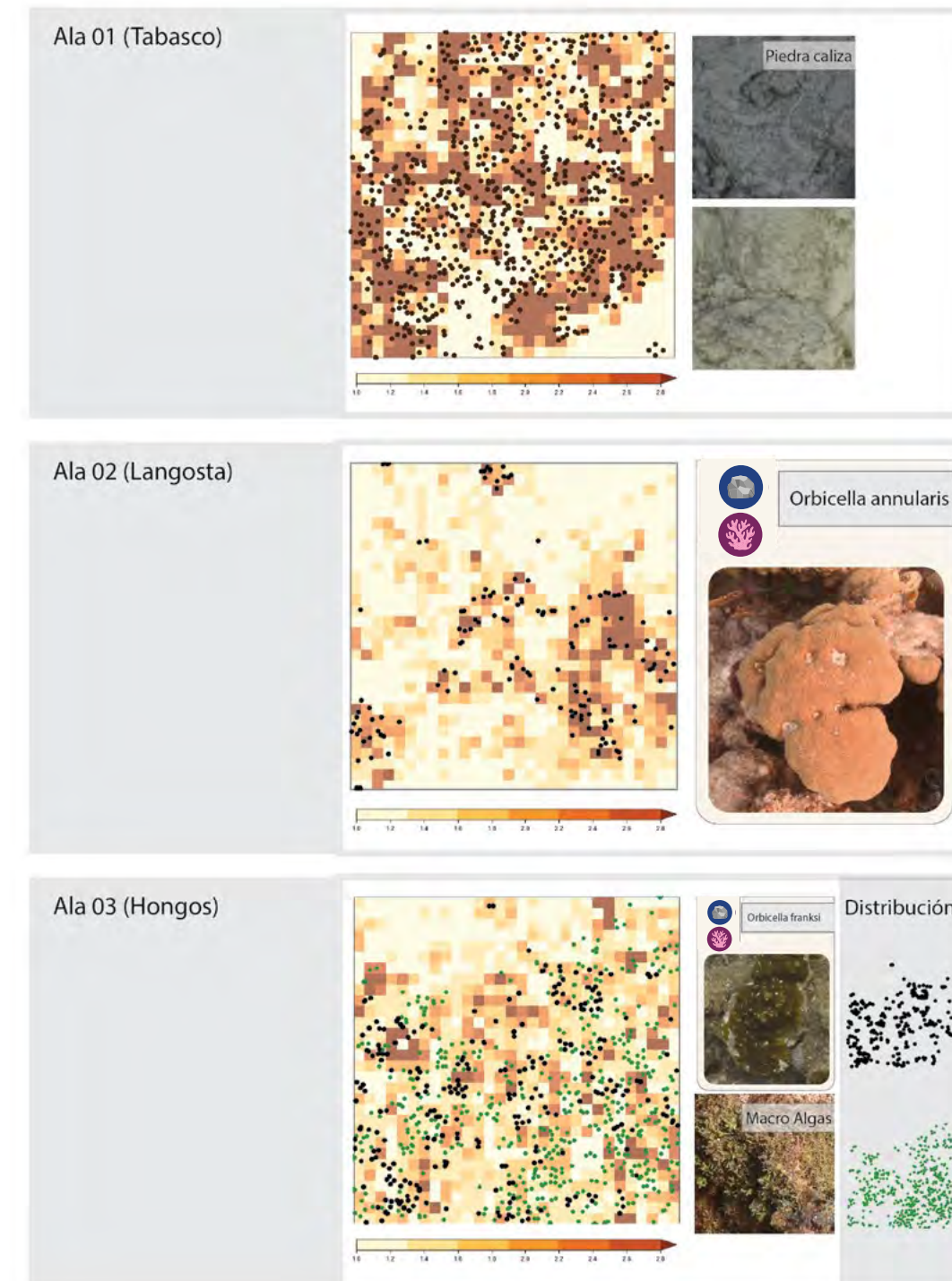

*Stephanocoenia
intersepta*

SINT



Anexo 7. Complejidad topográfica en el PNAA

En las siguientes imágenes se presentan los sitios con la información sobre la distribución de los principales elementos que proporcionan la complejidad y rugosidad. Entre mayor el valor de rugosidad, mayor complejidad estructural de los sitios estudiados. El sitio con mayor valor fue Tweed con 4.2 que se encuentra en zona de amortiguamiento.

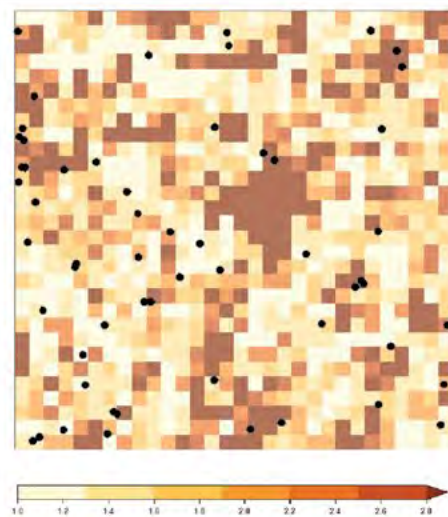


Ala 05 (Arco)

Rugosidad=2.108±0.1

Cobertura coralina= 3.5 %

Cobertuea macroalgas = 16.9 %

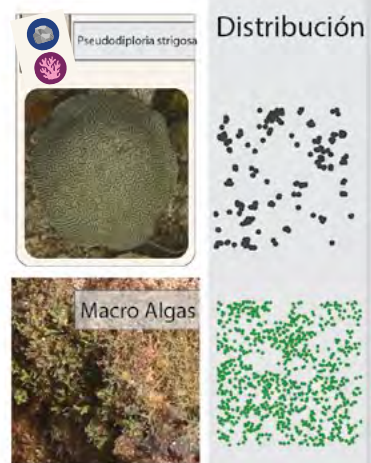
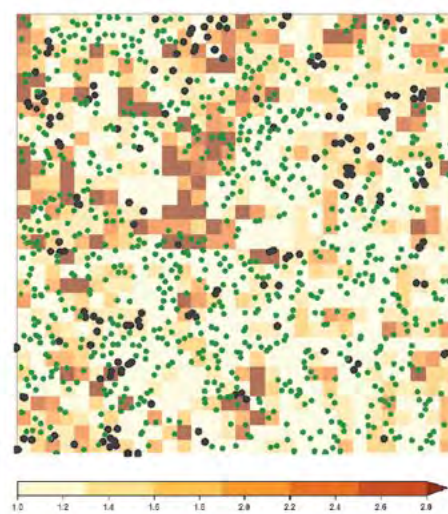


Ala 06 (Vapor)

Rugosidad=1.60 ±0.8

Cobertura coralina= 13 %

Cobertuea macroalgas = 34.2 %

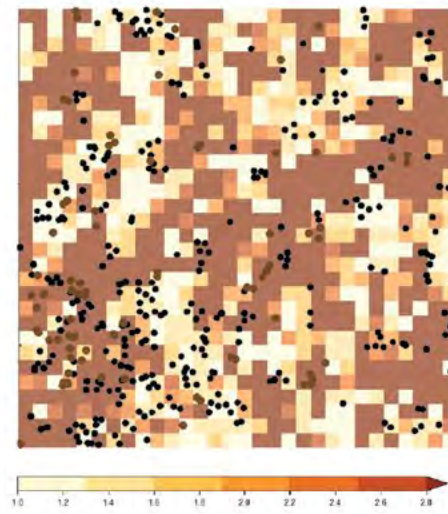


Ala 07 (Tweed)

Rugosidad=1.608±0.8

Cobertura coralina= 13 %

Cobertuea macroalgas = 34.2 %

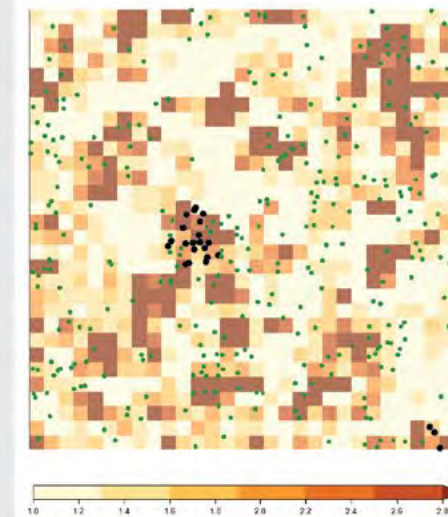


Ala 08 (Marisol)

Rugosidad=1.09±0.1

Cobertura coralina= 2.9 %

Cobertuea macroalgas = 13.5 %

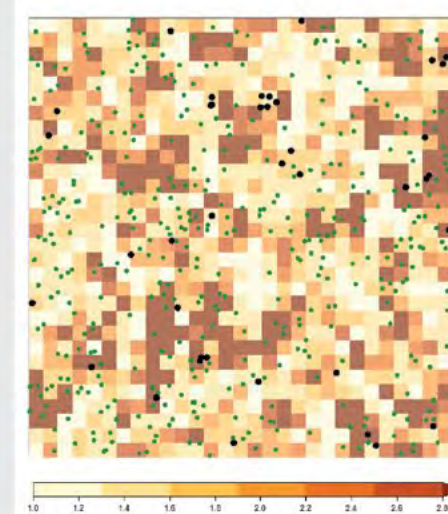


Ala 09 (Gorgonia Delfín)

Rugosidad=2.2 ±0.1

Cobertura coralina= 4.1 %

Cobertuea macroalgas = 18 %

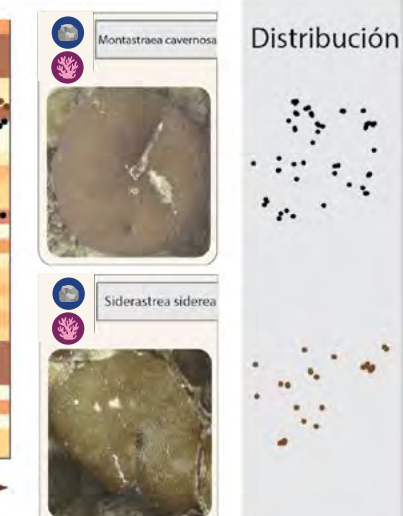
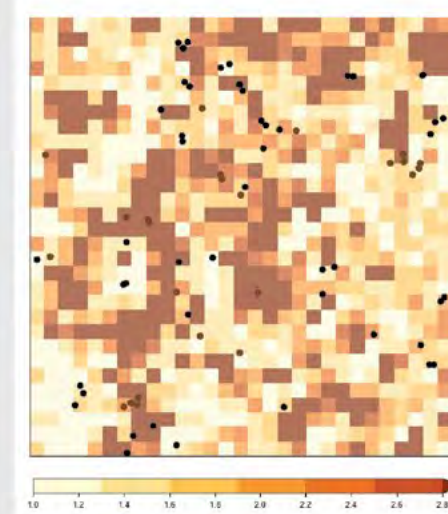


Ala 10 (Pendiente Norte)

Rugosidad=2.4±0.2

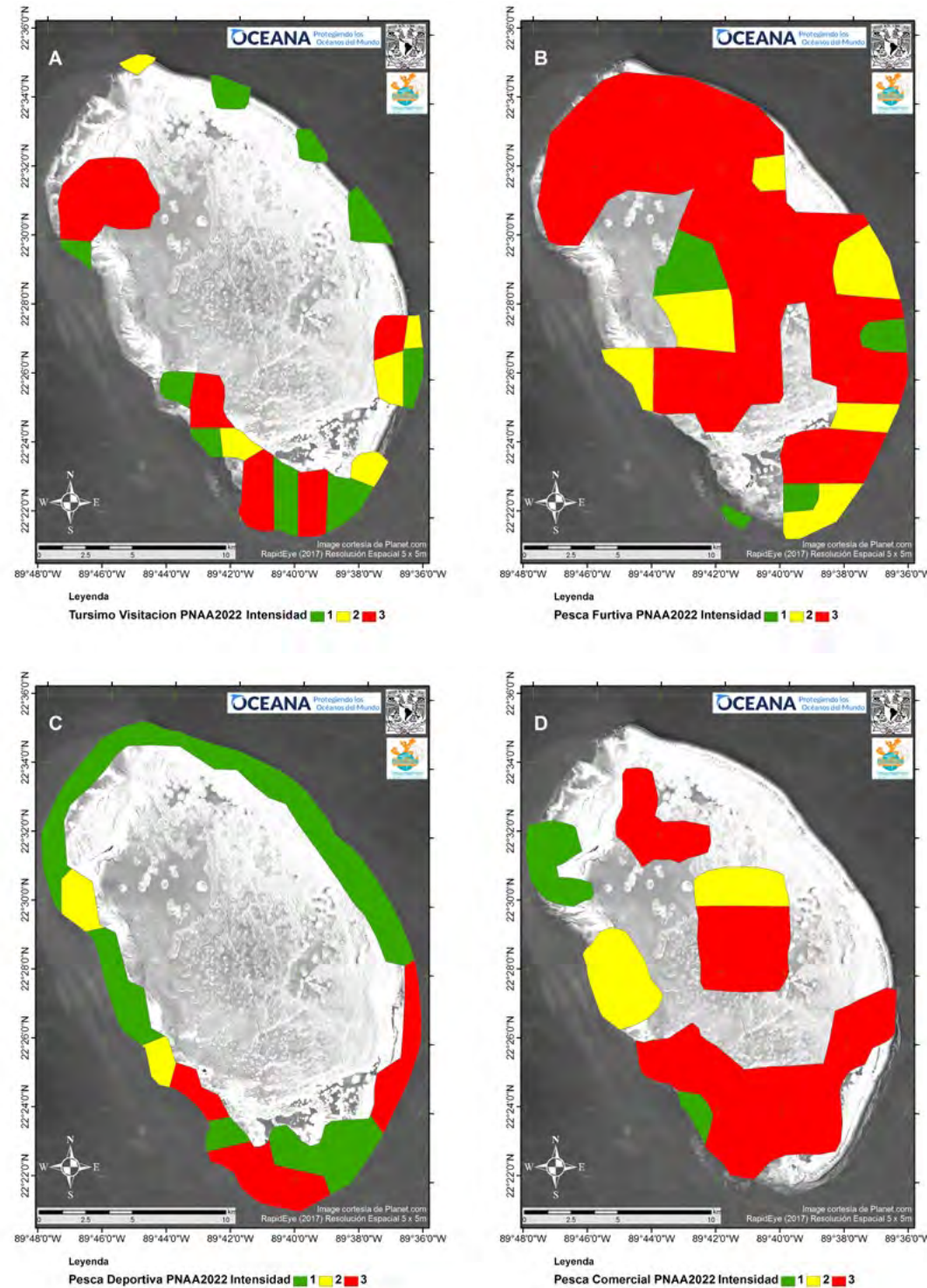
Cobertura coralina= 4.8 %

Cobertuea macroalgas = 13.0 %



Anexo 8. Mapas de intensidad de los usos en PNA

Imagen de los mapas: A) turismo/visitación, B) pesca furtiva, C) pesca deportiva, D) pesca comercial. Integrando las opiniones y conocimiento experto de actores y usuarios claves del PNA. En verde, intensidad de uso baja; amarillo, intensidad de uso media; rojo, intensidad de uso alta.



Anexo 9. Sitios de colecta de ADN ambiental

Información detallada de cada una de las 36 muestras de ADN ambiental (incluyendo réplicas) colectadas en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. El nombre de cada sitio corresponde al mapa de la Figura 2. Se muestra el número de muestra, número de sitio, la fecha en la que se realizó el muestreo, el nombre del sitio, la profundidad a la que fue colectada el agua, el número de réplica correspondiente a cada muestra, la temperatura del agua registrada a la profundidad del muestreo (en grados centígrados), y la latitud (Norte) y longitud (Oeste).

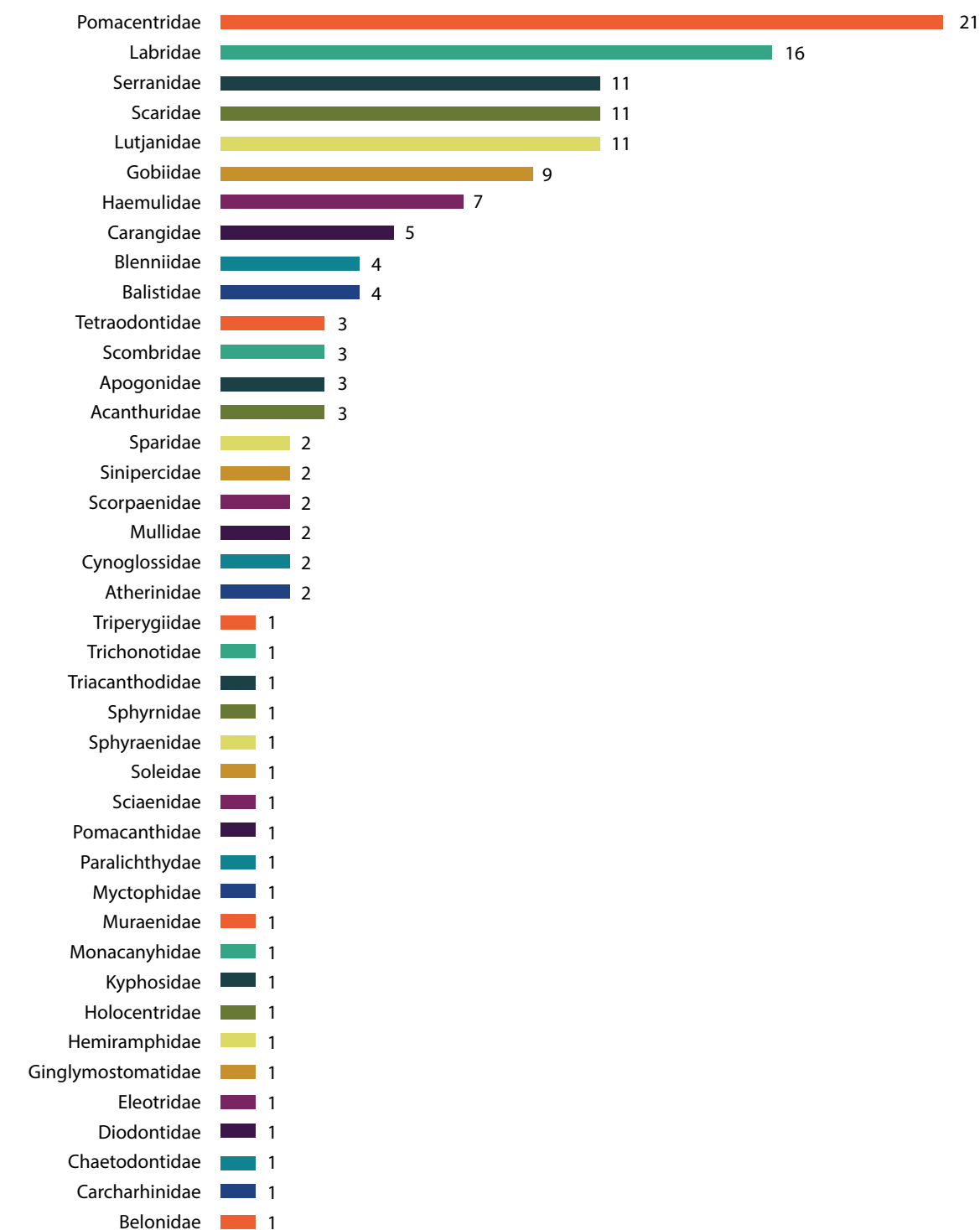
# Muestra	# Sitio	Fecha	Nombre Sitio	Profundidad	# Réplica	Temperatura (°C)	Latitud	Longitud
1	1	20 mayo 2022	Cerca de Hongos	20 m	1	27	22.3900	-89.7100
2		20 mayo 2022	Cerca de Hongos	20 m	2	27	22.3900	-89.7100
3		20 mayo 2022	Cerca de Hongos	20 m	3	27	22.3900	-89.7100
4	2	20 mayo 2022	Hongos	30 m	1	27	22.4000	-89.7100
5		20 mayo 2022	Hongos	30 m	2	27	22.4000	-89.7100
6		20 mayo 2022	Hongos	30 m	3	27	22.4000	-89.7100
7	3	21 mayo 2022	Pendiente Norte	30 m	1	27	22.4400	-89.7500
8		21 mayo 2022	Pendiente Norte	30 m	2	27	22.4400	-89.7500
9		21 mayo 2022	Pendiente Norte	20 m	3	27	22.4400	-89.7500
10	4	21 mayo 2022	Interior Nuevo	2.5 m	1	28	22.4300	-89.7300
11		21 mayo 2022	Interior Nuevo	7 m	2	28	22.4300	-89.7300
12		21 mayo 2022	Interior Nuevo	2.5 m	3	28	22.4300	-89.7300

# Muestra	# Sitio	Fecha	Nombre Sitio	Profundidad	# Réplica	Temperatura (°C)	Latitud	Longitud
13	5	22 mayo 2022	Gorgonia Delfín	25 m	1	27	22.4300	-89.7400
14		22 mayo 2022	Gorgonia Delfín	25 m	2	27	22.4300	-89.7400
15		22 mayo 2022	Gorgonia Delfín	20 m	3	27	22.4300	-89.7400
16	6	23 mayo 2022	Marisol	6 m	1	27	22.5000	-89.7900
17		23 mayo 2022	Marisol	6 m	2	27	22.5000	-89.7900
18		23 mayo 2022	Marisol	6 m	3	27	22.5000	-89.7900
19	7	23 mayo 2022	Niskin 1	53 m	1	22	22.5096	-89.8032
20		23 mayo 2022	Niskin 1	53 m	2	22	22.5096	-89.8032
21	8	23 mayo 2022	Niskin 2	57 m	1	22	22.5090	-89.8047
22		23 mayo 2022	Niskin 2	57 m	2	22	22.5090	-89.8047
23	9	23 mayo 2022	El Arco	30 m	1	26	22.5900	-89.7500
24		23 mayo 2022	El Arco	30 m	2	26	22.5900	-89.7500
25		23 mayo 2022	El Arco	30 m	3	26	22.5900	-89.7500
26	10	24 mayo 2022	Niskin 3	59 m	1	22	22.5900	-89.7600
27		24 mayo 2022	Niskin 3	59 m	2	22	22.5900	-89.7600
28	11	24 mayo 2022	Tweed	28	1	25	22.5500	-89.6600
29		24 mayo 2022	Tweed	28	2	25	22.5500	-89.6600
30		24 mayo 2022	Tweed	28	3	25	22.5500	-89.6600
31	12	24 mayo 2022	Niskin 4	48 m	1	25	22.4600	-89.6000
32		24 mayo 2022	Niskin 4	48 m	2	25	22.4600	-89.6000
33	Negativo	20 mayo 2022	Negativo	Agua barco	1			
34	Negativo	21 mayo 2022	Negativo	Agua barco	1			
35	Negativo	23 mayo 2022	Negativo	Agua barco	1			
36	Negativo	24 mayo 2022	Negativo	Agua barco	1			

Anexo 10. Familias de peces en PNAA identificadas con ADN ambiental

Resultado de las especies (OTU) de peces y tiburones a nivel de Familias detectados con ADN ambiental en Arrecife Alacranes durante la expedición científica en 2022.

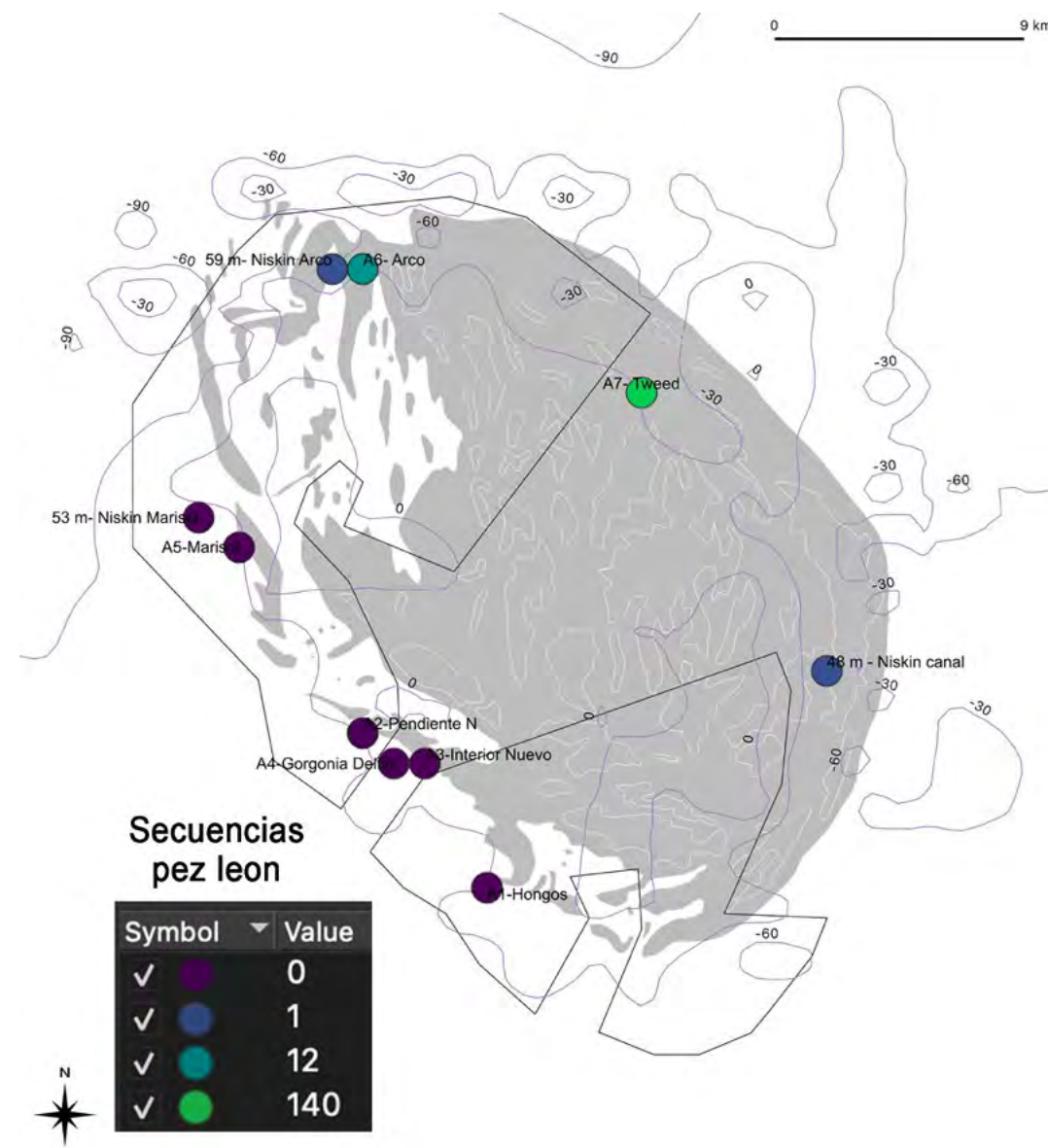
DIVERSIDAD DE ESPECIES / OTUS DENTRO DE FAMILIAS DE PECES EN ARRECIFES ALACRANES



ESPECIES / OTUS

Anexo 11. Presencia del pez león en el PNAA

En el mapa se muestra la presencia y número de lecturas de ADN ambiental para el pez león (*Pterois volitans*) en el Parque Nacional Arrecife Alacranes en la expedición de 2022. Se muestran los límites de la zona núcleo Norte y Sur, así como las isobatas de 30 m. La simbología se muestra en el recuadro dentro del mapa donde el morado son valores más bajos y el verde los más altos para el número de secuencias de pez león identificadas con el análisis de ADN ambiental.





OceanaMexico



OceanaMexico



oceanamexico



<https://mx.oceana.org/>



mexico@oceana.org