

Caracterización y evaluación de salud arrecifal del Parque Nacional **Arrecife Alacranes**

31 de enero de 2023

Kalanbio AC. *Research for conservation*

Índice

1. Resumen técnico	3
2. Puntos destacados.....	4
3. Introducción.....	7
3.1 Captura de información primaria	8
4. Objetivo general	8
4.1 Objetivos específicos	9
5. Método	9
5.1 Trabajo de campo	9
5.2 Procesamiento de imágenes.....	11
5.3 Extracción de la información	12
5.4 Análisis de datos	14
6. Resultados	15
6.1 Archivos relacionados a este reporte	15
6.2 Estructura de la comunidad coralina	15
6.3 Complejidad topográfica.....	16
6.4 Índice Integral de Salud Arrecifal.....	20
7. Recomendaciones.....	24
8. Agradecimientos.....	25
9. Literatura citada	25
Anexo 1. Catálogo fotográfico de las especies de corales duros registrados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.....	27
Anexo 2. Complejidad topográfica en los sitios de monitoreo del Parque Nacional Arrecife Alacranes.....	33

1. Resumen técnico

Proyecto: Caracterización y evaluación de salud arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes

Colaboración entre: Kalanbio A.C. “*Research for conservation*” y OCEANA México,

Expediciones:

- I) Parque Nacional Arrecife Alacranes, del 2 al 5 de septiembre de 2021
- II) Parque Nacional Arrecife Alacranes, del 19 al 24 de mayo de 2022

Informe realizado por: Antar M. Pérez-Botello^{1,2,3}, Gabriel Cervantes³ y Yoalli Quetzalli Hernández Díaz^{2,3}

¹Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto de Abrigo s/n, C.P. 97356, Sisal, Yucatán, México.

²Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Unidad Sisal, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto de Abrigo s/n, C.P. 97356, Sisal, Yucatán, México.

³Kalanbio, A.C. “*Research for conservation*”.

Citar cómo: Kalanbio AC & OCEANA México (2023). Caracterización y evaluación de salud arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes. *Repositorio de campañas y actividades de Kalanbio AC*. 1-32.

2. Puntos destacados

- De acuerdo con el **Índice Integral de Salud Arrecifal (IISA)**, los resultados del análisis de **salud arrecifal** de este estudio en el que se analizaron nueve diferentes sitios dentro del Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) tanto en la zona núcleo como en zonas de amortiguamiento, concluye con una calificación general de **2.45**, lo que equivale a la categoría **“MAL”**, señalando que el área arrecifal en promedio no debería ser considerada como saludable. Sin embargo, dos sitios de forma individual obtuvieron la categoría de “Bien”, mismos que se mencionan más adelante. Se recomienda realizar acciones de manejo adecuadas para incrementar el estado de salud arrecifal del PNAA.
- La categoría que les fue asignada a cada uno de los nueve sitios estudiados de acuerdo con su **porcentaje de cobertura coralina** es la siguiente:
 - Únicamente el sitio ALA-03 (Hongos) alcanzó la categoría “Bien”.
 - Los sitios ALA-06 (Vapor) y ALA-07 (Tweed) obtuvieron la categoría “Regular”.
 - El sitio ALA-02 (Langosta) obtuvo la categoría “Mal”.
 - Los sitios ALA-01 (Tabasco), ALA-05 (Arco), ALA-08 (Marisol), ALA-09 (Pendiente Norte) y ALA-10 (Gorgonia Delfín), obtuvieron la categoría “Crítico”.
- La categoría que les fue asignada a cada uno de los nueve sitios estudiados de acuerdo con su **porcentaje de cobertura de algas carnosas** es la siguiente:
 - Los sitios ALA-01 (Tabasco) y ALA-02 (Langosta) alcanzaron la categoría “Muy Bien”.
 - Los sitios ALA-03 (Hongos), ALA-05 (Arco), ALA-08 (Marisol), ALA-09 (Pendiente Norte) y ALA-10 (Gorgonia Delfín) obtuvieron la categoría “Mal”.

- Los sitios ALA-06 (Vapor) y ALA-07 (Tweed), obtuvieron la categoría “Crítico”.
- La categoría que les fue asignada a cada uno de los nueve sitios estudiados de acuerdo con el **Índice Integral de Salud Arrecifal** es la siguiente:
 - El sitio ALA-01 (Tabasco): Categoría “Regular”.
 - Los sitios ALA-02 (Langosta) y ALA-03 (Hongos): Categoría “Bien”.
 - Los sitios ALA-05 (Arco), ALA-06 (Vapor), ALA-07 (Tweed), ALA-08 (Marisol), ALA-09 (Pendiente Norte) y ALA-10 (Gorgonia Delfín): Categoría “Mal”.
- La **riqueza de especies de corales duros en el PNAA** durante el procesamiento de 9 cuadros de 10 x 10 m² en diferentes puntos de monitoreo fue de **20 especies**. Las especies más comunes que se encontraron en todos los sitios fueron tres: *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria strigosa* (coral cerebro) y *Siderastrea siderea*. Cabe mencionar que la especie *Porites astreoides*, especie de coral duro de tipo maleza, se encontró en ocho de los nueve sitios.
- La **estructura comunitaria coralina** del PNAA se encuentra principalmente representada por las especies de coral duro que registraron la **mayor cobertura**: *Pseudodiploria strigosa* (coral cerebro) 27.88%; *Orbicella franksi* 11.00%; *Pseudodiploria clivosa* 8.00% y *Montastraea cavernosa* 7.30%. Mientras que, otros grupos altamente representados fueron los corales blandos 24.00% y los hidrocorales (*Millepora*) 9.30%.
- Los sitios que obtuvieron la mayor **complejidad topográfica** del estudio fueron ALA-07 (Tweed) con un valor 4.19 de rugosidad, ALA-09 (Pendiente norte) con 2.51 de rugosidad y ALA-10 (Gorgonia delfín) con 2.36 de rugosidad. Lo que sugiere que son sitios con un perfil heterogéneo con gran variedad de hábitats.
- Las especies que favorecieron el registro de una **elevada complejidad** y que a su vez presentaron una **alta cobertura coralina** fueron tres: *Pseudodiploria strigosa* 27.88%, *Montastraea cavernosa* 7.36% y *Orbicella annularis* 6.00%.

- Se destaca que la distribución espacial de las macroalgas carnosas en cada punto de monitoreo coincide consistentemente con la distribución espacial de los corales duros que dominaron en cada sitio.
- Los resultados presentados en este reporte permitirán tomar decisiones más informadas y con datos de mejor calidad relacionados a estado de salud del PNAA. Se recomienda la implementación de un plan de restauración en los sitios que presentaron categorías de **Malas a Críticas**.
- También recomendamos a los manejadores de Parque prestar especial atención a los sitios **ALA_03 (Hongos)** y **ALA_07 (Tweed)**, ya que se encontraron en los límites entre las categorías **Bien** y **Regular** en el porcentaje de cobertura coralina y una complejidad estructural media y alta, 1.7 y 4.2 respectivamente. Por lo tanto, medidas eficientes de manejo locales podrían modificar la calificación que se obtuvo para ambos sitios.
- Identificar las especies de coral clave y la espacialización de la rugosidad en cada sitio de monitoreo es esencial para tomar decisiones informadas en cuanto a conservación y restauración del PNAA. Este tipo de estudios permitirán a los administradores del Parque diseñar estrategias de monitoreo, conservación y restauración más efectivas y adaptar las estrategias actuales a las condiciones específicas de este sistema arrecifal, garantizando su recuperación a largo plazo.

3. Introducción

El sistema coralino Arrecife Alacranes forma parte de un área natural protegida con el estatus de Parque Nacional. Su manejo y monitoreo está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Una de las principales importancias de Arrecife Alacranes es que al ser el sistema arrecifal más grande del Golfo de México funciona como fuente de especies, tanto de corales, como de vertebrados e invertebrados para el resto de los sistemas arrecifales del Golfo. Siendo una de las grandes reservas de organismos, aumentando la resiliencia de la región promoviendo la regeneración de estos ecosistemas después de una perturbación.

Actualmente el plan de manejo de este arrecife cuenta con: Dos Zonas Núcleo, ubicadas al norte y al sur del sistema arrecifal, y una zona de amortiguamiento englobando el límite del parque (CONANP 2006).

Zona Núcleo Norte (AlaZNN): se encuentra situada en la porción norte del zócalo arrecifal. Forma un polígono que rodea el noroeste del arrecife en forma semicircular. Abarca aproximadamente 3km fuera de la barrera y cubre una superficie de 19,732ha, incluyendo Isla Desterrada. En esta zona presenta regiones de cobertura marina desnuda de vegetación y con profundidades mayores a 5m, y regiones con formaciones arrecifales.

Zona Núcleo Sur (AlaZNS): se encuentra delimitada por un polígono que encierra la porción sur del zócalo arrecifal, con una superficie de 11,937ha. En esta zona se encuentran ecosistemas que presentan un grado de modificación humana bajo. Incluye áreas con una elevada productividad y riqueza de recursos pesqueros y turísticos de importancia económica y a semejanza de la zona núcleo norte, crecen pastos marinos en donde efectúan su ciclo biológico varias especies tanto de vertebrados como invertebrados marinos. En dicho polígono se localizan Isla Muertos o Desertora, Isla Pérez e Isla Pájaros.

Zona de Amortiguamiento (AlaZA): Está delimitada por un polígono ovalado en Dirección SE-NW que rodea el arrecife y encierra las zonas núcleo del parque, definido por el límite del mar territorial -de la isobata de 40m a una distancia de aproximadamente 22km mar adentro. El área resultante queda delimitada entre los meridianos 89° 24' 04" y 90° 00'

28" de longitud oeste y entre los paralelos 22° 47' 56" y 22° 09' 01" de latitud norte, con una superficie de 333,715ha. La máxima distancia en el sentido Norte-Sur es de 72.48 km mientras que en el sentido Este-Oeste es de 62.58km.

3.1 Captura de información primaria

Este proyecto está fundamentado en un método denominado fotogrametría. La fotogrametría es una técnica basada en la recopilación de información de posición y dimensión de objetos a partir de dos o más fotografías (Schenk 2005). Las fotografías se consideran la información primaria, y los productos resultantes son un modelo 3D obtenido del post-procesamiento de las imágenes y una proyección 2D que recupera la información de todas las fotografías realizadas (Habib et al. 2007; Ferrari et al. 2016). Esta técnica permite generar reconstrucciones digitales tridimensionales y mapas en dos dimensiones del terreno muestreado (Habib et al. 2007).

Con esta técnica se obtiene un mapa del fondo marino con una resolución espacial de milímetros, identificando y midiendo diferentes características bióticas y abióticas como especies bentónicas, amenazas potenciales, enfermedades y sustratos (Edwards et al. 2017; Pedersen et al. 2019). También es posible rastrear el cambio en el fondo marino a lo largo del tiempo, por ejemplo, el crecimiento o la muerte de especies sésiles, el éxito de programas de restauración ambiental y el seguimiento de los fenómenos ambientales que afectan el fondo marino (Pedersen et al. 2019; Kodera et al. 2020; Ferrari et al. 2021).

Otra ventaja de este método es el alto potencial para comunicar los resultados a la población no científica. Parte de los productos resultantes son modelos 3D con los que se pueden generar recorridos virtuales personalizados sobre el área de estudio, el fenómeno de interés o las especies bentónicas objetivo (Suka et al. 2019; Sandin et al. 2021).

4. Objetivo general

Establecer puntos estratégicos de monitoreo a largo plazo en el PNAA para dar seguimiento al estado de salud arrecifal de este sistema coralino, obteniendo información clave arrecifal que ayude en la adecuada toma de decisiones del plan de manejo y conservación del área natural.

4.1 Objetivos específicos

- i) Actualizar el estado de conocimiento de la salud arrecifal de sitios estratégicos del Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA).
- ii) Actualizar la lista de especies de corales duros.
- iii) Calcular el porcentaje de cobertura de diez características arrecifales.
- iv) Identificar las especies coralinas clave en la generación de complejidad topográfica dentro del PNAA.

5. Método

5.1 Trabajo de campo

Este proyecto recopila la información de 9 sitios de monitoreo de dos campañas realizadas en el PNAA (Tabla 1; Figura 1). La primera se realizó del 2 al 5 de septiembre de 2021 a bordo del barco Mayan Dive y la segunda se llevó a cabo del 19 al 24 de mayo de 2022 a bordo del barco Caribbean Kraken. La toma de muestras consistió en: i) marcar un cuadro de 10 x 10 m a una profundidad de entre 5 y 20 m, ii) tomar una serie de fotografías con dos cámaras realizando un patrón de zigzag hasta cubrir toda el área delimitada, y iii) descargar toda la información obtenida de manera sistemática, ordenada y estandarizada, por punto de muestreo, y iv) procesar la información fotográfica de cada punto de muestreo.

Tabla 1. Ubicación, fecha, nombre y número de fotografías capturadas en cada punto de monitoreo en el Parque Nacional Arrecife Alacranes durante las campañas de Oceana México en 2021 y 2022.

Fecha	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Área (m²)	Fotografías
02/09/2021	EM_ALA_01	Tabasco	22.36754	-89.67426	100	5034
02/09/2021	EM_ALA_02	Langosta	22.39773	-89.67194	100	7968
04/09/2021	EM_ALA_05	Arco	22.58483	-89.75362	100	11390
04/09/2021	EM_ALA_06	Vapor	22.53829	-89.65501	100	6198
05/09/2021	EM_ALA_08	Marisol	22.50024	-89.78677	100	4434
20/05/2022	EM_ALA_03	Hongos	22.39598	-89.70581	100	3282
21/05/2022	EM_ALA_09	Pendiente Norte	22. 44131	-89. 75062	100	4678
22/05/2022	EM_ALA_10	Gorgonia Delfín	22.42801	-89.74075	100	4590
24/05/2022	EM_ALA_07	Tweed	22.54601	-89.66083	100	6260

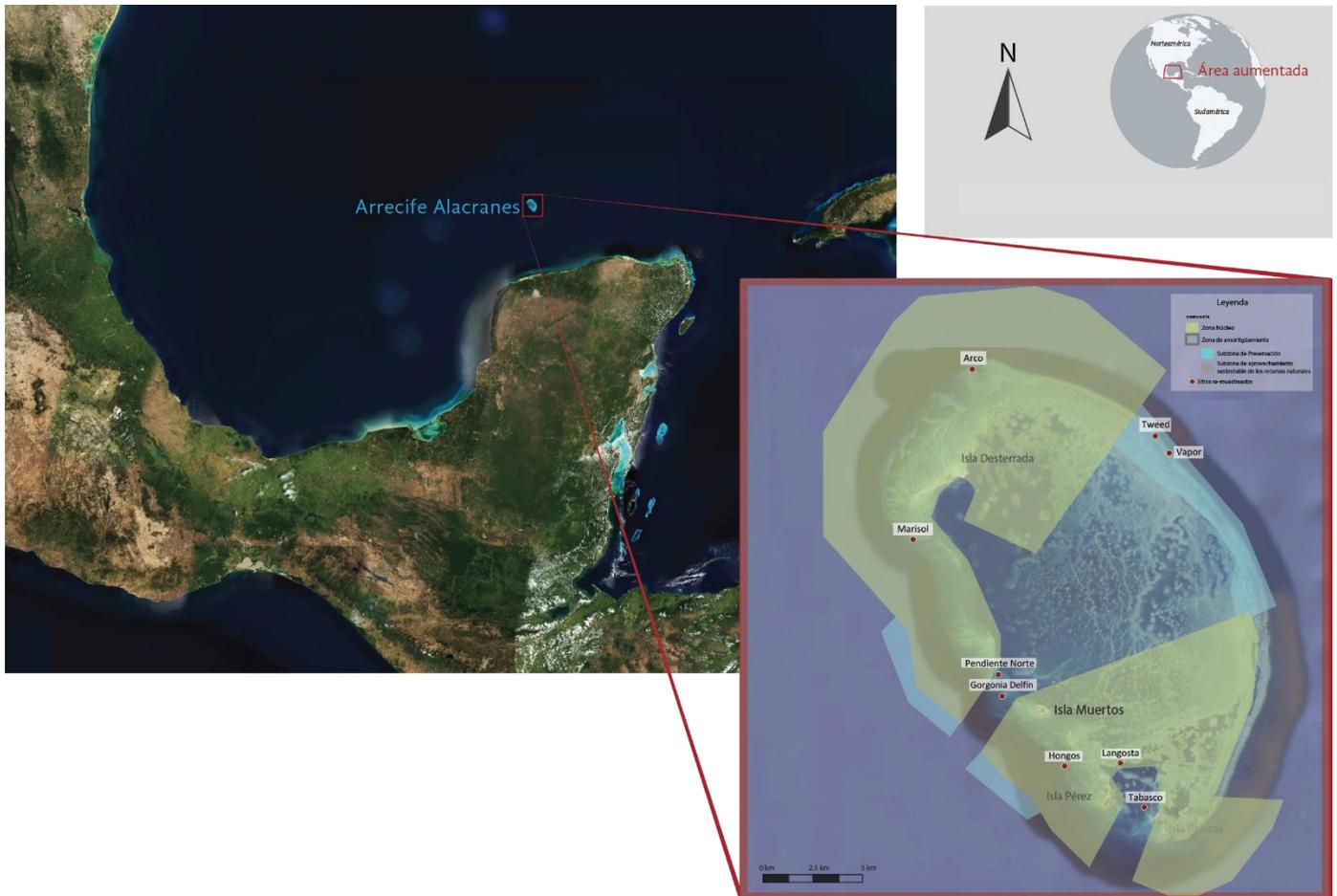


Figura 1. Mapa de los puntos de monitoreo en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

5.2 Procesamiento de imágenes

Las imágenes obtenidas de cada punto de muestreo fueron procesadas con AgiSoft Metashape para generar los mapas 3D del fondo arrecifal. Los mapas 3D se analizaron con el programa VisCore para escalar y orientar los mapas, para caracterizar los elementos arrecifales y calcular la complejidad topográfica (rugosidad) de cada sitio y generar una ortoproyección en 2D (mapa cartográfico).

5.3 Extracción de la información

Para optimizar la calidad y cantidad de información extraída de cada sitio de monitoreo se realizó una estancia de investigación en el Laboratorio de Stuart Sandin del Departamento de Biología Marina, Instituto de Oceanografía Scripps, de la Universidad de San Diego, Estados Unidos. El Objetivo de esta estancia fue continuar con la capacitación brindada en noviembre de 2021 para aumentar la calidad y cantidad de información extraída de cada punto de monitoreo.

El procesamiento de los mapas 3D se basó en la caracterización e identificación de 11 tipos de rasgos arrecifales, los cuales fueron (Figura 2): i) Corales duros, ii) Corales blandos, iii) Algas carnosas, iv) Algas calcáreas, v) Cianobacterias, vi) Esponjas, vii) Otros invertebrados, viii) Pedacearía coralina, ix) Arena, x) Macizo calcáreo, y xi) Estructura coralina muerta.

Con esta caracterización se obtuvo una lista de especies de corales duros por punto de monitoreo y en total para el PNAA. De igual manera se calculó el porcentaje de cobertura de cada característica arrecifal y por grupo funcional coralino: i) Corales constructores, ii) Corales tipo roca, iii) Corales tipo maleza y iv) Corales blandos. Esta información se descargó y ordenó de manera coherente para su posterior análisis.

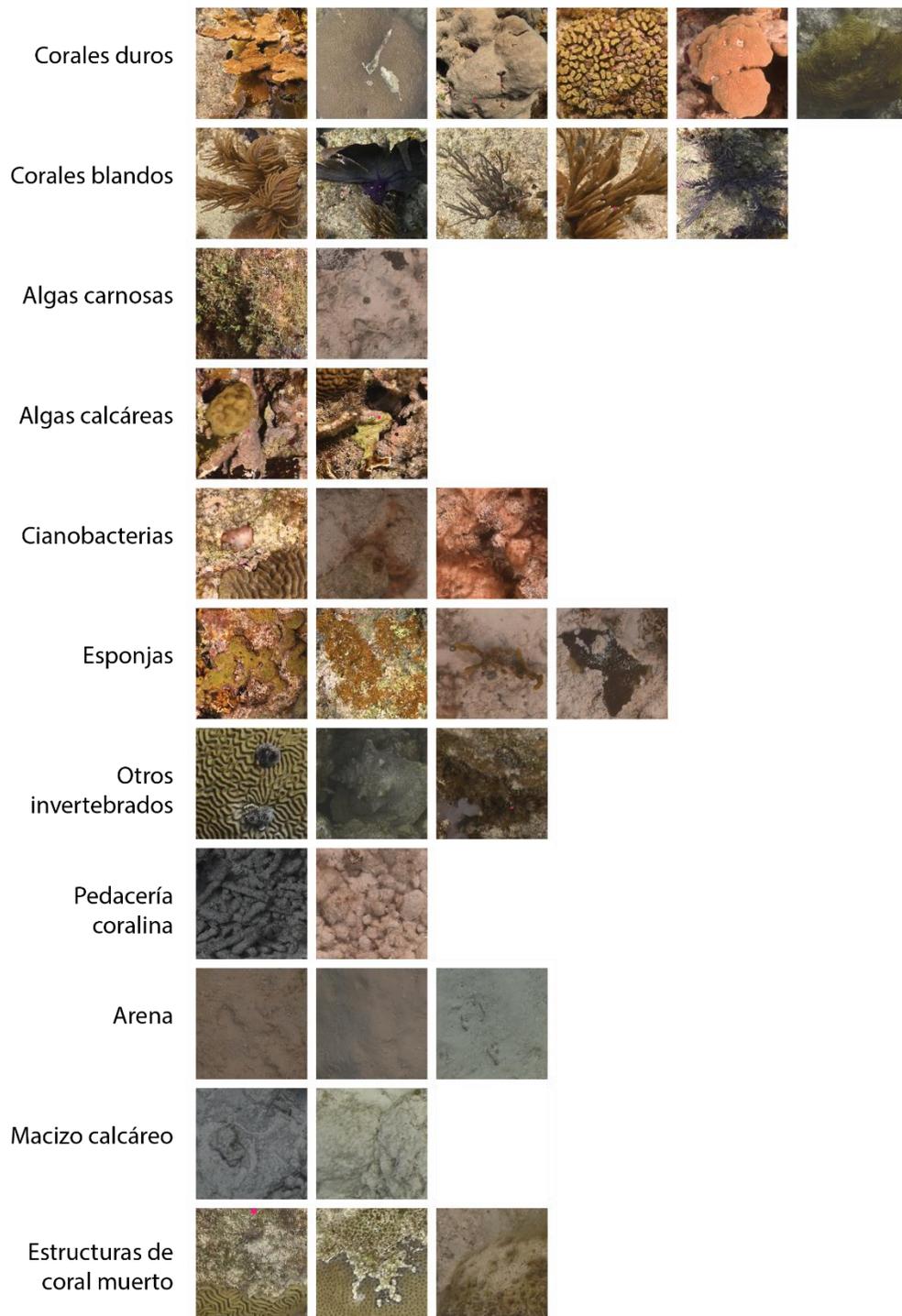


Figura 2. Lista de rasgos arrecifales identificados en cada mapa 3D dentro del Parque Nacional Arrecife Alacranes.

5.4 Análisis de datos

Se realizaron tres tipos de análisis complementarios. El primero, fue el cálculo del porcentaje de cobertura coralina por grupo funcional (corales constructores, corales tipo roca, corales tipo maleza y corales blandos), el segundo la estimación de complejidad topográfica por punto de monitoreo junto con la identificación de las características arrecifales que están generando esta complejidad estructural y, por último, con la suma de toda esta información se calculó el índice Integral de la Salud Arrecifal (McField and Richards 2007; McField et al. 2020; Healthy Reefs for Healthy People 2022) por punto de monitoreo y en total para el PNAA. Los indicadores utilizados (Tabla 2) para cada sitio de monitoreo y en total para el Parque fueron: i) porcentaje de cobertura coralina y, ii) el porcentaje de cobertura de macroalgas carnosas.

Con estos análisis fue posible actualizar el estado de salud del sistema arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes, así como identificar cuáles son las especies clave de corales que están involucradas en la generación de complejidad estructural el cada punto de monitoreo y, por último, se actualizaron las especies de corales duros presentes en el Parque.

Tabla 2. Valores críticos de los indicadores bentónicos utilizados para calcular el Índice Integral de Salud Arrecifal.

Valor de los indicadores			Índice Integral de Salud Arrecifal	
Rango	Corales duros	Algas carnosas	Rango	Escala
Muy bien	40%	1%	Muy bien	5-4.3
Bien	20%	5%	Bien	4.2-3.5
Regular	10%	12%	Regular	3.4-2.7
Mal	5%	25%	Mal	2.6-1.9
Crítico	<5%	>25%	Crítico	1.8-1

6. Resultados

6.1 Archivos relacionados a este reporte

Con la información fotográfica se generaron 9 mapas 3D actualizados para Arrecife Alacranes (Tabla 3). Para cada sitio se tiene un archivo Metashape Project (.psx), una nube de puntos (.ply), un archivo VisCore (.vml), un archivo con la clasificación de las características arrecifales (.pq), un archivo de complejidad topográfica (.rugo), y un archivo GeoTIFF (.tif).

Tabla 3. Relación de productos digitales asociados a este reporte.

Tipo de archivo	ALA_01 (Tabasco)	ALA_02 (Langosta)	ALA_05 (Arco)	ALA_06 (Vapor)	ALA_08 (Marisol)	ALA_03 (Hongos)	ALA_09 (Pendiente Norte)	ALA_10 (Gorgonia Delfín)	ALA_07 (Tweed)
Metashape Project (.psx)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Nube de puntos (.ply)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Archivo VisCore (.vml)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Características arrecifales (.pq)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Complejidad topográfica (.rugo)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
GeoTIFF (.tif)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

6.2 Estructura de la comunidad coralina

La estructura de la comunidad de corales duros del PNAA está compuesta principalmente por 20 especies (Figura 3) de corales duros dominando en cobertura *Pseudodiploria strigosa* (27.88% de cobertura), *Orbicella franksi* (11%), *Pseudodiploria clivosa* (8%) y *Montastraea cavernosa* (7.36%; Figura 5). De igual manera, el PNAA presenta regiones con compuestas por especies de corales blandos (24%) e hidrocorales (género *Millepora*; 9.30%). En general la comunidad presente en el Parque está dominada por especies con altas tasas de calcificación como son *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria* spp. y *Orbicella* spp., sin

embargo, también se registró una dominancia particular de especies coralinas oportunistas con tasas de calcificación baja como son *Porites astreoides* y *Agaricina* sp.

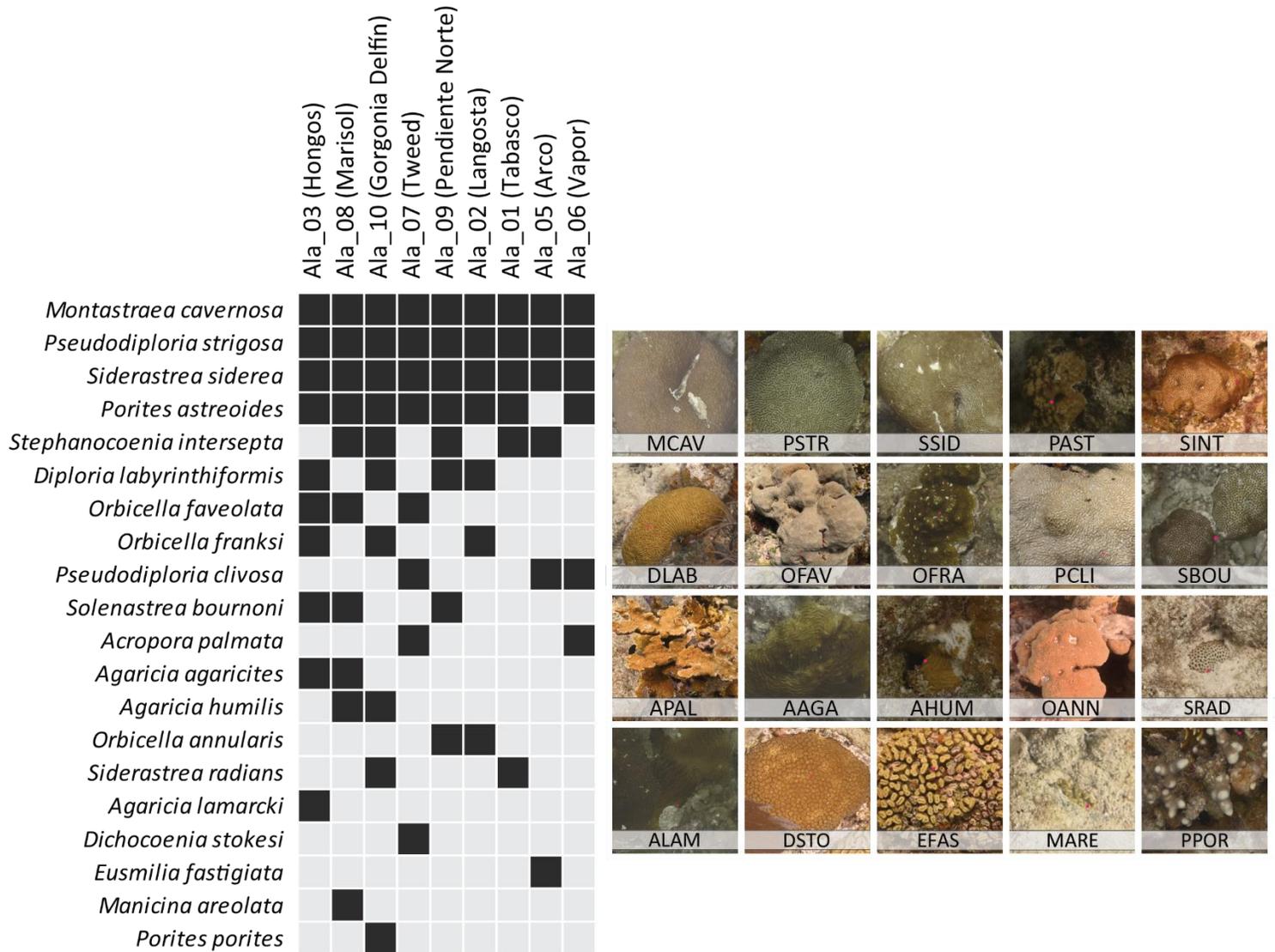


Figura 3. Presencia y ausencia de corales duros en los sitios de muestreo del Parque Nacional Arrecife Alacranes.

6.3 Complejidad topográfica

La complejidad estructural y tridimensional de los arrecifes medida como la rugosidad del fondo arrecifal, nos permite mediante un valor reconocer si un ambiente arrecifal es capaz

de brindar a través de las estructuras calcáreas, servicios cómo: refugio, protección contra depredadores y heterogeneidad del hábitat.

EL PNAA presenta una alta heterogeneidad topográfica (rugosidad) con sitios poco complejos dominados por piedra caliza, pedacearía coralina y arena, y otros sitios más complejos dominados por estructuras que aportan tridimensionalidad al sistema (Figura 4). Los puntos con mayor rugosidad fueron ALA 07 (Tweed) dominado por las especies coralinas *Pseudodiploria strigosa* y *P. clivosa*, ALA 10 (Gorgonia Delfín) dominado por las especies coralinas *Montastraea cavernosa* y *Siderastrea siderea*, y ALA 09 (Pendiente Norte) siendo abundante la especie *Montastraea cavernosa*. Los sitios con menor rugosidad incluyen a ALA 02 (Langosta), ALA 06 (Vapor) y ALA 03 (Hongos).

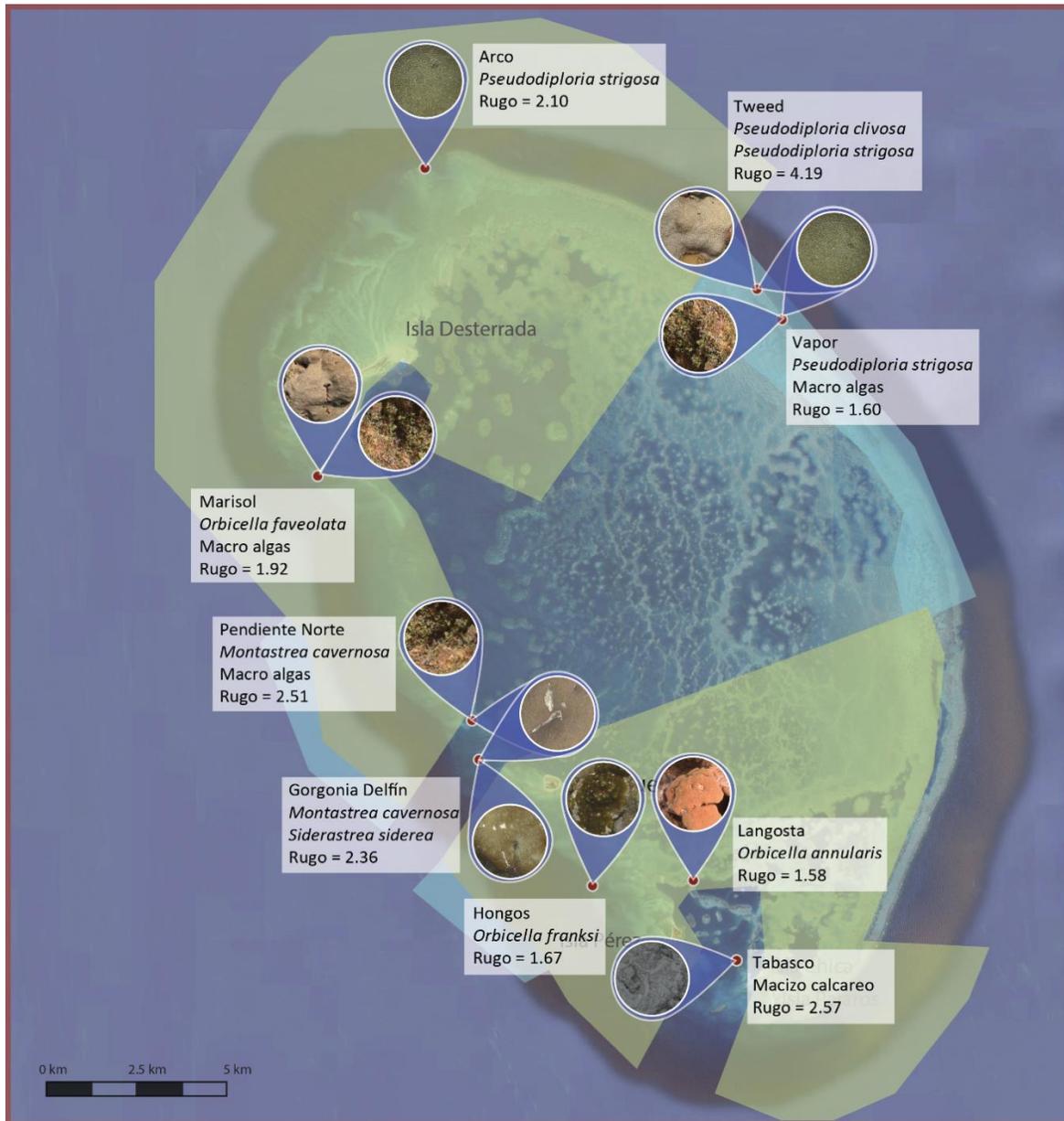


Figura 4. Mapa de especies coralinas clave de acuerdo con su aporte a la complejidad topográfica (Rugo=rugosidad) en cada punto de monitoreo.

Con el método utilizado en este proyecto además de poder calcular el valor de rugosidad para cada sitio también es posible mapear esta rugosidad a lo largo de los 100 m² muestreados e identificar cada uno de los elementos que aportan a la complejidad del sistema. En el PNAa las especies coralinas clave que aportan más, tanto en cobertura como en complejidad estructural son *Pseudodiploria strigosa* (27.88%; promedio rugosidad = 2.33

± desviación estándar 1.53), *Montastraea cavernosa* (7.36%; promedio rugosidad = 2.10± 1.05) y *Orbicella annularis* (cobertura= 6%; promedio rugosidad = 2.5; ± 1.2). Es importante remarcar que la distribución de macroalgas carnosas dentro de cada punto de monitoreo coincide en gran medida con la distribución espacial de los diferentes corales duros dominantes en cada sitio. Estas algas carnosas pueden estar compitiendo por espacio con las especies coralinas. Para la complejidad topográfica de cada sitio de monitoreo revisar el Anexo 2 de este reporte.

A nivel de sitio de muestreo, el punto con mayor rugosidad, ALA 01 (Tweed), se observa una alta distribución de *Pseudoploria strigosa* de manera homogénea en todo el sitio, *Pseudoploria clivosa* también ocurre de forma regular en todo el sitio, pero con menor porcentaje de cobertura (Figura 5 superior). Sumado a lo antes mencionado, los valores más altos de rugosidad coinciden con la presencia de *Pseudoploria strigosa* y *P. clivosa*. En uno de los sitios con menor valor de rugosidad, ALA 03 (Hongos), se observa que *Orbicella franski* y las macroalgas se distribuyen mayormente en la parte inferior izquierda del sitio (Figura 5 inferior). Esta información es relevante en el momento de intervención y medidas de manejo en estos ecosistemas ya que permite establecer potenciales sitios de restauración con especies de coral ideóneas ya establecidas en cada sitio. En el Anexo 2 se presentan todos los sitios con la información particular de la distribución de los principales elementos que proporcionan la complejidad y rugosidad.

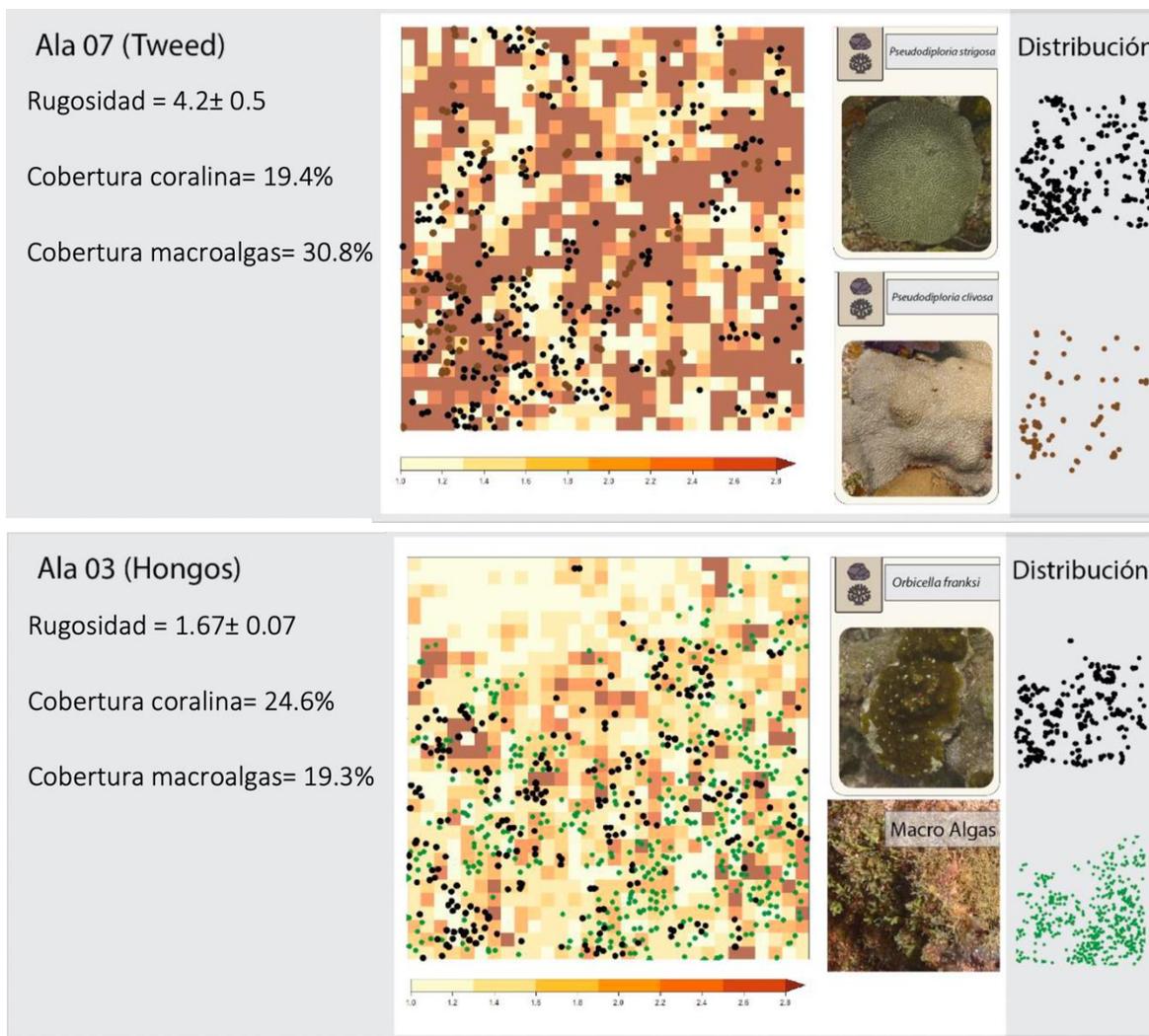


Figura 5. Mapeo del promedio de rugosidad y distribución de los elementos dominantes en dos sitios de muestreo. La imagen superior corresponde al sitio de monitoreo Ala_7 (Tweed) la imagen inferior es del sitio Ala_03 (Hongos). El promedio de rugosidad se calculado a una resolución espacial de 3 cm por pixel.

6.4 Índice Integral de Salud Arrecifal

En promedio, el PNAА presentó una calificación de **Mal (2.45)** en el Índice Integral de Salud Arrecifal (IISA) (Healthy Reefs for Healthy People, 2022; Tabla 4). Esta evaluación indica que los puntos de monitoreo requieren de acciones inmediatas para promover la recuperación del porcentaje de cobertura coralina (Figura 6) y disminuir la competencia de macroalgas o algas carnosas (Figura 7). Dos sitios analizados están en condiciones de salud **Bien** y siete sitios están en la categoría de **Mal**. Esto corresponde a que el 86% de los sitios muestreados presentan un grado de deterioro importante.

Tabla 4. A. Porcentaje de cobertura, B. Calificación obtenida, y C. Calculo numérico y categórico del Índice Integral de Salud Arrecifal (IISA) para cada punto de muestreo (Azul= Muy Bien; Verde= Bien; Amarillo= Regular; Naranja= Mal; Rojo= Crítico).

	A. Cobertura (%)		B. Calificación		C. Índice Integral	
	Corales duros	Algas carnosas	Corales duros	Algas carnosas	IISA	IISA Categórico
ALA_1 (Tabasco)	0.756	1.849	1	5	3	Regular
ALA_2 (Langosta)	8.104	0.403	2	5	3.5	Bien
ALA_3 (Hongos)	21.615	19.320	4	3	3.5	Bien
ALA_5 (Arco)	3.549	16.982	1	3	2	Mal
ALA_6 (Vapor)	13.017	34.190	3	1	2	Mal
ALA_7 (Tweed)	19.391	30.872	3	1	2	Mal
ALA_8 (Marisol)	2.909	13.524	1	3	2	Mal
ALA_9 (Pendiete Norte)	4.107	17.974	1	3	2	Mal
ALA_10 (Gorgonia Delfín)	4.788	13.027	1	3	2	Mal

Las señales principales que se detectaron indicando una mala salud arrecifal es el sobrecrecimiento de algas carnosas y de tapetes de microalgas sumado a la baja cobertura coralina de la mayoría de los sitios. Para calcular un Índice Integral de Salud Arrecifal más robusto se recomienda ingresar información de otros invertebrados de importancia ecológica como erizos de la especie *Diadema sp.*, de biomasa de peces comerciales y de biomasa de peces herbívoros.

En la Figura 6 y 7 se muestran los valores críticos para los indicadores “cobertura de corales” y “cobertura de macroalgas”. En estos gráficos se observa que los sitios con mayor cobertura de macroalgas obtienen una calificación menor en este indicador aparte de estar asociados a valores bajos (menores de 10%) de cobertura de coral. Para sitios como Ala_03 (Hongos) y Ala_07 (Tweed) se observa una buena cobertura de corales duros que compite contra la dominancia de macroalgas promoviendo una mejor calificación en el IISA. Con este tipo de relaciones se puede observar qué elementos determinan la salud de los sitios para su potencial manejo e intervención temprana para evitar su degradación.

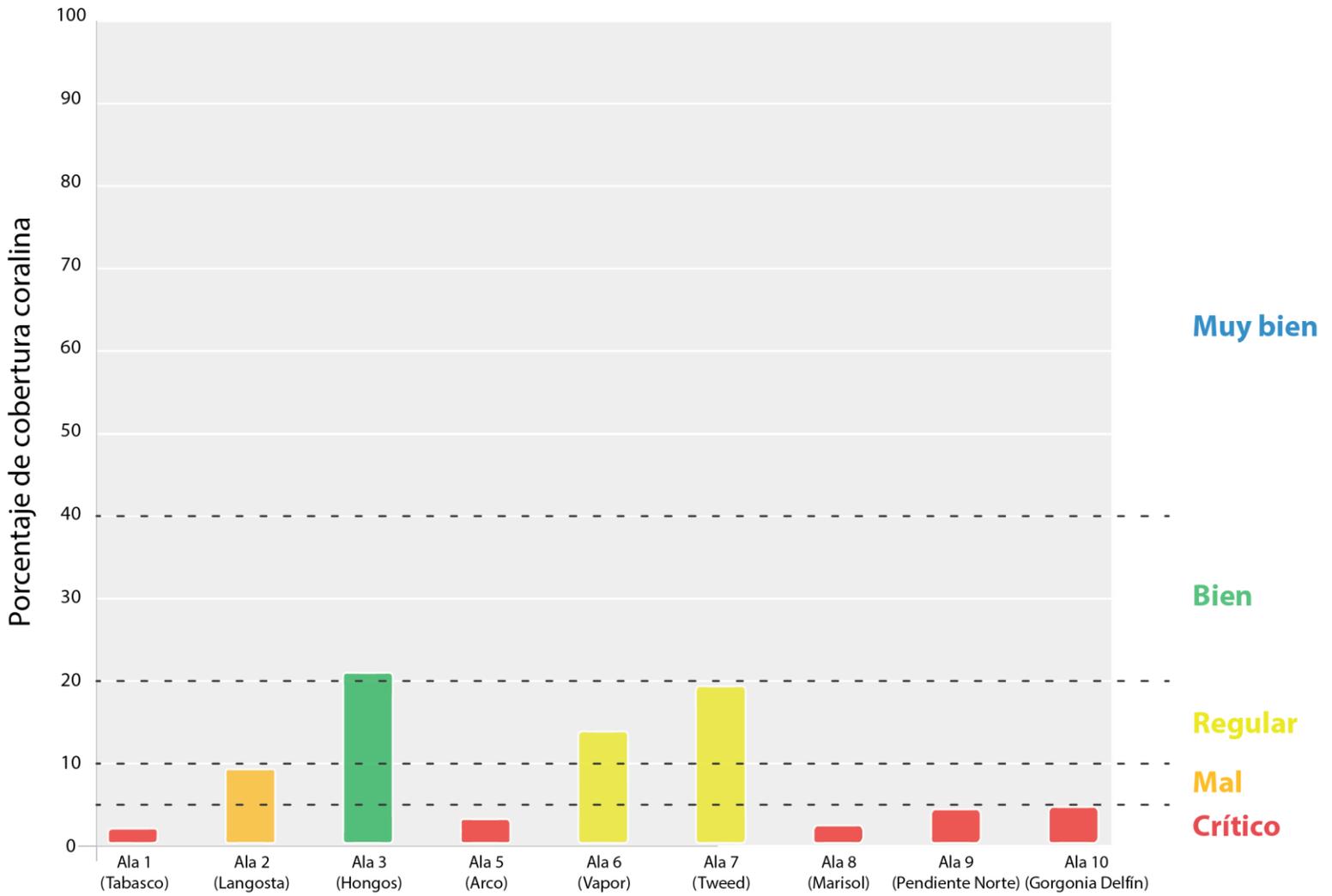


Figura 6. Gráfica de barras que muestra el porcentaje de cobertura coralina para cada punto de muestreo. Las líneas punteadas representan los límites críticos para el indicador bentónico de cobertura coralina (Healthy Reefs for Healthy People, 2022).

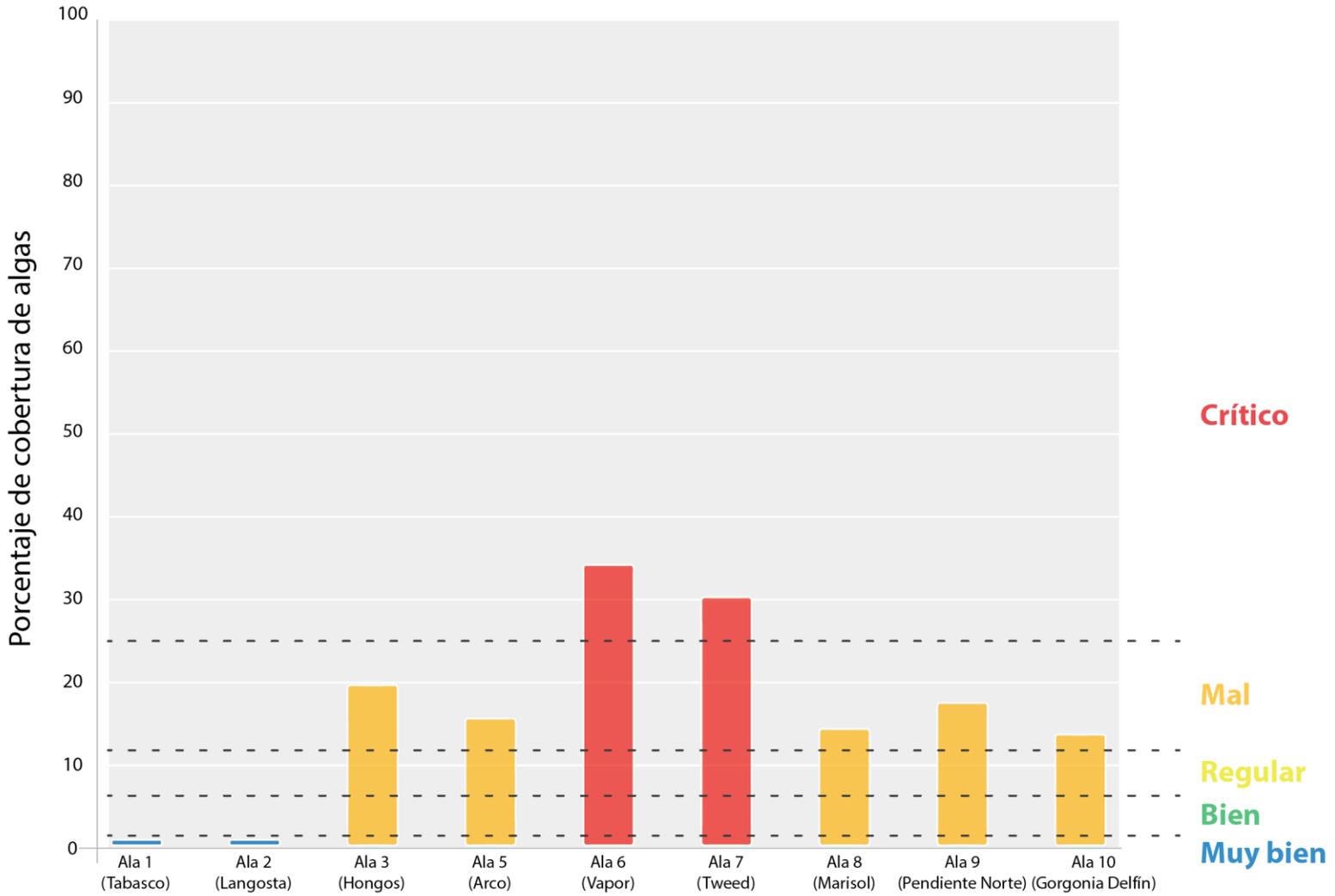


Figura 7. Gráfica de barras del porcentaje de cobertura de algas carnosas para cada punto de muestreo. Las líneas punteadas representan los límites críticos para el indicador bentónico de cobertura algal (Healthy Reefs for Healthy People, 2022).

7. Recomendaciones

Al cumplir los objetivos establecidos, se logró actualizar el estado de salud del sistema arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes y obtener identificaciones actualizadas de las especies de corales duros presentes en el área. Además, se caracterizaron indicadores arrecifales que podrían estar relacionados con el estado de conservación de cada sitio de monitoreo, así como las especies clave de corales responsables de generar complejidad estructural dentro del PNAA.

Este estudio y el método utilizado reducen la subjetividad de las identificaciones realizadas, lo que se traduce en una mayor calidad de los datos capturados. El uso de imágenes de alta resolución de cada sitio de monitoreo permitió generar un registro del estado actual del PNAA que podrá ser analizado en el presente y en el futuro sin sufrir pérdidas de información.

Tener estaciones de monitoreo georreferenciadas y bien delimitadas permitirá visitar exactamente cada sitio para dar seguimiento al estado de conservación del PNAA. Además, al ser un método espacialmente explícito, se podrán observar cambios de cada elemento identificado a lo largo del tiempo.

Los resultados presentados en este reporte permitirán tomar decisiones más informadas en cuanto a la conservación del PNAA. Se recomienda la implementación de un plan de restauración en los sitios que presentaron categorías de Malas a Críticas, prestando especial atención a los sitios ALA_03 (Hongos) y ALA_07 (Tweed). Estos dos sitios se encuentran en los límites de las calificaciones **Bien** y **Regular** del indicador “porcentaje de cobertura coralina”, y con una complejidad estructural media y alta de 1.7 y 4.2 respectivamente. Por lo tanto, medidas eficientes de manejo o perturbaciones locales podrían modificar la calificación que se obtuvo para ambos sitios.

La rugosidad es un indicador de la cantidad de superficie disponible para colonizar por diferentes especies o de la heterogeneidad ambiental, lo que influye directamente en la biodiversidad y la productividad de los arrecifes de coral. En pocas palabras, a mayor rugosidad y cobertura coralina se puede asumir que un arrecife es más sano. Por tal motivo,

identificar las especies de coral clave encargadas de generar rugosidad en cada sitio de monitoreo permitirá a los administradores del PNAA proponer planes de restauración más efectivos y adecuarlos a las condiciones actuales de este sistema arrecifal.

Por otro lado, el mapeo de la rugosidad en cada sitio de monitoreo será útil para medir los cambios en complejidad estructural del arrecife. Monitorear estos cambios a lo largo del tiempo permitirá identificar las regiones donde se requiere actuar y también permitirá identificar aquellas zonas donde los esfuerzos están siendo efectivos, lo que facilita la evaluación de las medidas de conservación y restauración implementadas.

En resumen, identificar las especies clave de coral y mapear la rugosidad en cada sitio de monitoreo son dos herramientas esenciales para tomar decisiones informadas en cuanto a conservación y restauración del PNAA. Este tipo de estudios van a permitir que los administradores del parque diseñen estrategias de monitoreo, conservación y restauración más efectivas y adapten las estrategias actuales a las condiciones específicas de este sistema arrecifal, garantizando su recuperación a largo plazo.

Por último, para tener una visión más integral del sistema arrecifal, se recomienda complementar los resultados de este estudio con la evaluación de la biomasa de herbívoros y biomasa de peces presentes en cada sitio.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen a todo el equipo de OCEANA México, a Teresa Vidal (por facilitar transporte terrestre el San Diego, California, USA y la identificación de un mapa), al Dr. Stuart Sandin, a Nathaniel Holloway, Clinton Edwards, Nicole Pedersen, Esmeralda Alcantar, Beverly French y Orion McCarthy del SCRIPPS, Universidad de San Diego, por su apoyo y enseñanza durante el procesamiento de la información.

9. Literatura citada

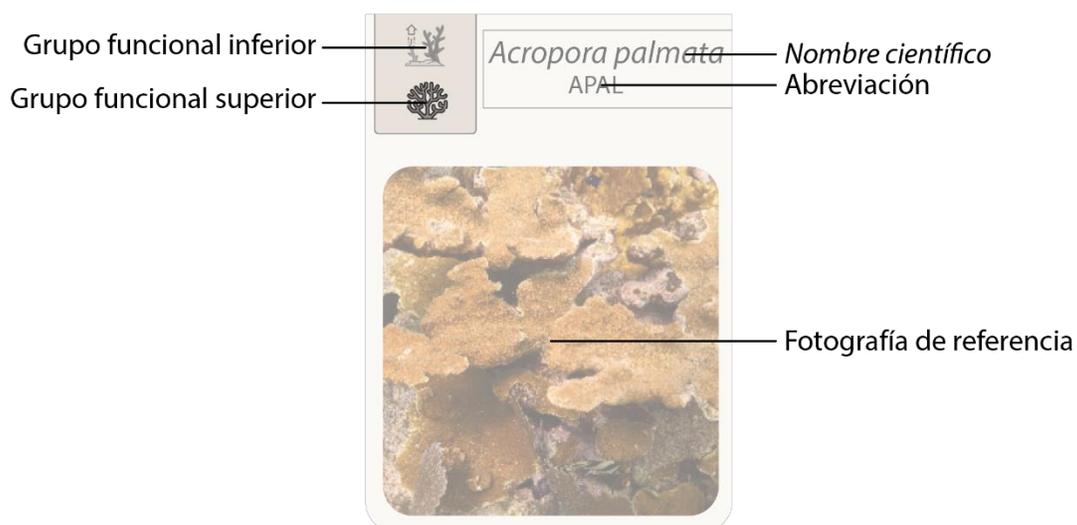
CONANP (2006) Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Arrecife Alacranes.
CONANP-SEMARNAT

- Edwards CB, Eynaud Y, Williams GJ, Pedersen NE, Zgliczynski BJ, Gleason ACR, Smith JE, Sandin SA (2017) Large-area imaging reveals biologically driven non-random spatial patterns of corals at a remote reef. *Coral Reefs* 36:1291–1305
- Ferrari R, Lachs L, Pygas DR, Humanes A, Sommer B, Figueira WF, Edwards AJ, Bythell JC, Guest JR (2021) Photogrammetry as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends in Ecology and Evolution* 36:1093–1101
- 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 modelling. *Remote Sensing* 8:
- Habib AF, Kim EM, Kim CJ (2007) New methodologies for true orthophoto generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73:25–36
- Healthy Reefs for Healthy People (2022) Healthy Reefs Indicators. <https://www.healthyreefs.org/cms/healthy-reef-indicators/>
- Kodera SM, Edwards CB, Petrovic V, Pedersen NE, Eynaud Y, Sandin SA (2020) Quantifying life history demographics of the scleractinian coral genus *Pocillopora* at Palmyra Atoll. *Coral Reefs* 39:1091–1105
- McField M, Kramer P, Giró-Petersen A, Soto M, Drysdale I, Craig N, Rueda-Flores M (2020) Reporte del Arrecife Mesoamericano. *Healthy Reefs for Healthy People Initiative* 36
- McField M, Richards KP (2007) *Healthy reefs for healthy people: a guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican reef region*. With contributions by M. Gorrez and M. McPherson. 208 pp
- Pedersen NE, Edwards CB, Eynaud Y, Gleason ACR, Smith JE, Sandin SA (2019) The influence of habitat and adults on the spatial distribution of juvenile corals. *Ecography* 42:1703–1713
- Sandin S, Smith J, Brian Z (2021) *The Scripps Oceanography 100 Island Challenge*. 41

Schenk T (2005) Introduction to Photogrammetry. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University 79–95

Suka R, Asbury M, Couch CS, Gray AE, Winston M, Oliver T (2019) Processing Photomosaic Imagery of Coral Reefs Using Structure-from-Motion Standard Operating Procedures. 1–54

Anexo 1. Catálogo fotográfico de las especies de corales duros registrados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.



Grupos funcionales inferiores



Competidor



Tipo roca



Maleza

Grupos funcionales superiores



Coral duro



Coral blando



Acropora palmata
APAL



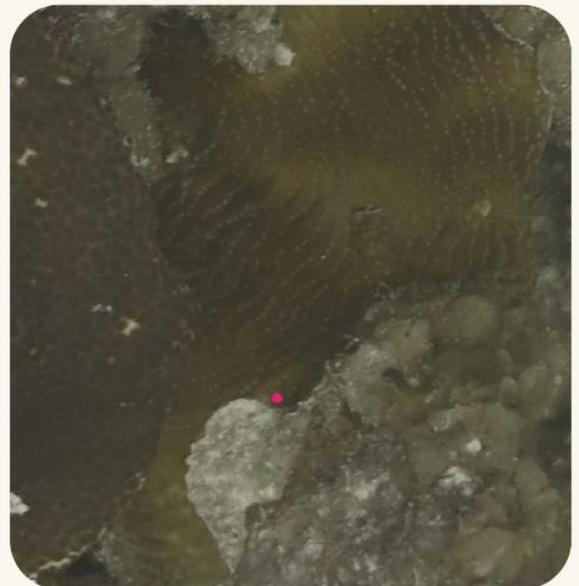
Agaricia agaricites
AAGA



Agaricia humilis
AHUM



Agaricia lamarcki
ALAM

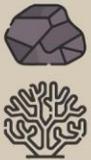




Dichocoenia stokesi
DSTO



Diploria labyrinthiformis
DLAB



Eusmilia fastigiata
EFAS



Montastraea cavernosa
MCAV





Orbicella annularis
OANN



Orbicella faveolata
OFAV



Orbicella franksi
OFRA



Porites astreoides
PAST





Porites porites
PPOR



Pseudodiploria clivosa
PCLI



Pseudodiploria strigosa
PSTR



Siderastrea radians
SRAD





Siderastrea siderea
SSID



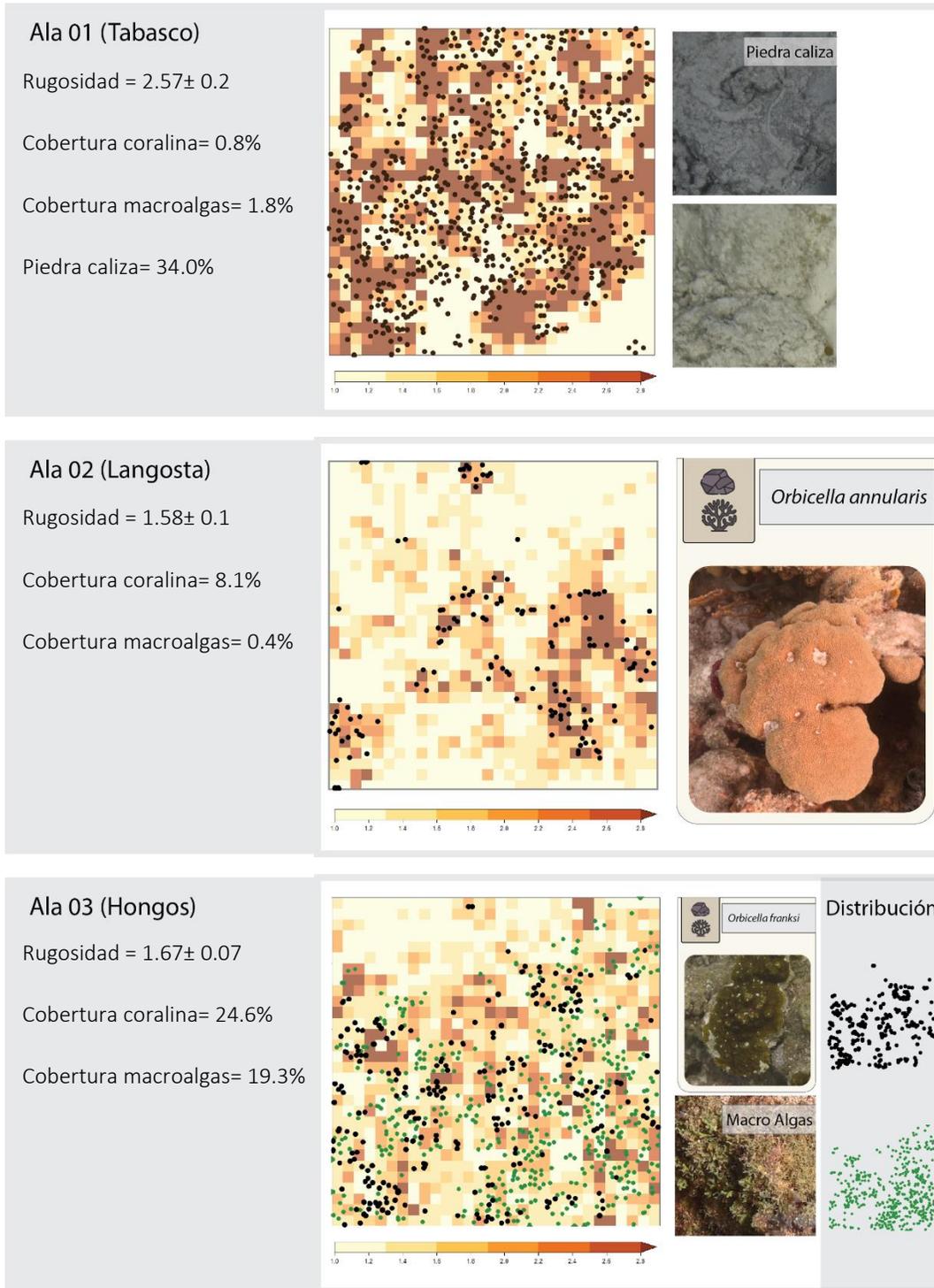
Solenastrea bournoni
SBOU



Stephanocoenia intersepta
SINT



Anexo 2. Complejidad topográfica en los sitios de monitoreo del Parque Nacional Arrecife Alacranes.

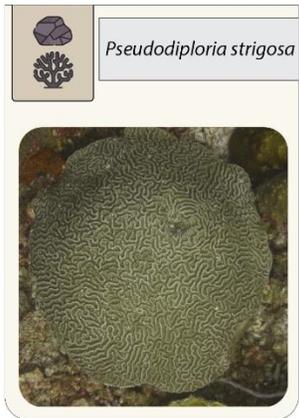
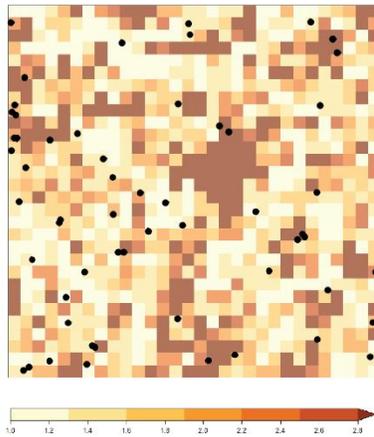


Ala 05 (Arco)

Rugosidad = 2.108 ± 0.1

Cobertura coralina = 3.5%

Cobertura macroalgas = 16.9%

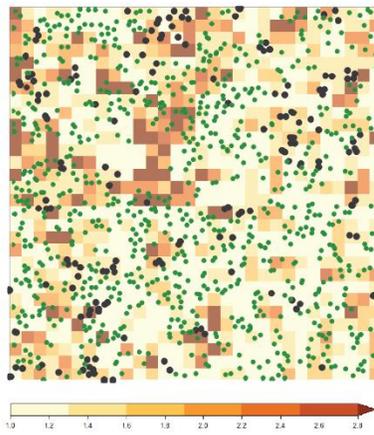


Ala 06 (Vapor)

Rugosidad = 1.6 ± 0.8

Cobertura coralina = 13.0%

Cobertura macroalgas = 34.2%



Distribución

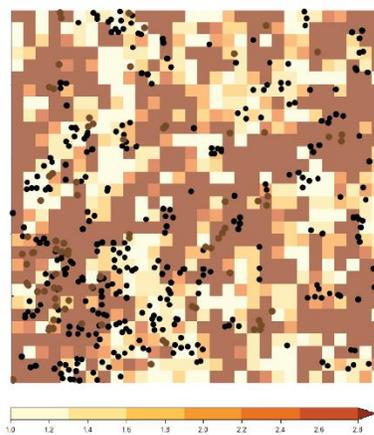


Ala 07 (Tweed)

Rugosidad = 4.2 ± 0.5

Cobertura coralina = 19.4%

Cobertura macroalgas = 30.8%



Distribución



