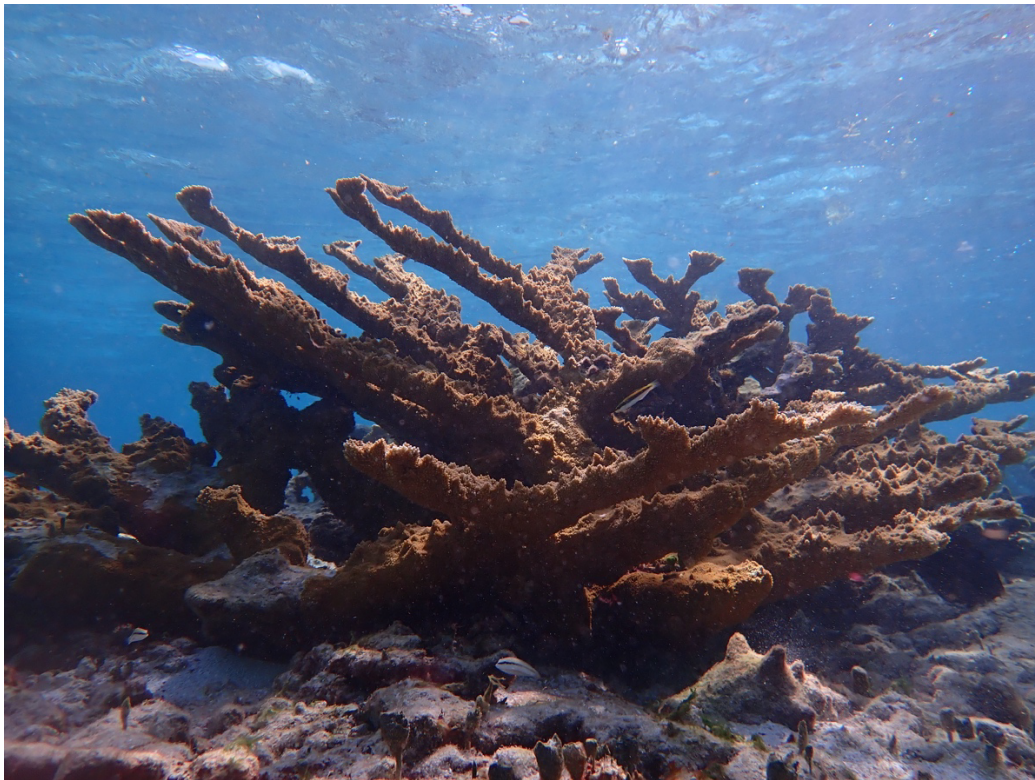




Priorización Espacial para la Actualización de la Zonificación del Parque Nacional Arrecife Alacranes



Reporte Presentado por:

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez

Dra. Ángela Randazzo Eisemann

*Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e investigación, Sisal
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México*

5 de diciembre 2022, Mérida, Yucatán



Reporte elaborado para Oceana por:

Garza-Pérez, J. R. & Randazzo-Eisemann, A. (2022) "Priorización Espacial para la Actualización de la Zonificación del Parque Nacional Arrecife Alacranes." Reporte de Expedición Oceana México, agosto 2022. pp.142.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece formalmente la colaboración y apoyo brindado por el personal del Parque Nacional Arrecife Alacranes de la CONANP: Biol. Cristóbal Enrique Cáceres G. Cantón, director, M.C. Brenda Hernández Hernández, subdirectora, y M.C. Simeí Marisol Campos Bobadilla, analista, por su invaluable apoyo en asesoría, logística, trámites y permisos para la realización de este proyecto.

Se agradece formalmente también al personal de la Secretaría de Pesca y Acuicultura Sustentables de Yucatán (SEPASY) por las facilidades brindadas 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, Rene Salinas Salazar.

Asimismo, se agradece 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 de Poseidon Dive Center y al Dr. Armin Tuz por el apoyo logístico en Isla Pérez. Un especial agradecimiento al valioso y profesional equipo de trabajo de campo, quienes participaron en la colecta de datos *in situ*: M.C. Ana Molina, Lic. Ernesto Hevia y M.C. Quetzalli Hernández.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. MANEJO INTEGRAL DE LA ZONA COSTERA	8
2.2. ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS COMO HERRAMIENTAS DE MANEJO	9
2.3. ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS	10
2.4. PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL	11
2.5. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA SATELITAL COMO HERRAMIENTA DE MANEJO	12
2.6. ESTRUCTURA GEOMORFOLÓGICA DE ALACRANES	13
3. ANTECEDENTES	15
4. JUSTIFICACIÓN	17
5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS	19
6. MÉTODOS	20
6.1. ÁREA DE ESTUDIO	20
6.1. DISEÑO MUESTRAL	20
6.2. COLECTA DE DATOS	25
6.3. ANÁLISIS GEOGRÁFICO PRIMARIO	26
6.3.1. GENERACIÓN DE ESQUEMAS DE CLASIFICACIÓN	26
6.3.2. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE HÁBITATS	27
6.4. ANÁLISIS DE DATOS ECOLÓGICOS	29
6.4.1. HÁBITATS BENTÓNICOS	29
6.4.2. DIVERSIDAD	30
6.4.3. SALUD ARRECIFAL	31
6.4.4. CAMBIOS ECOLÓGICO TEMPORALES	31
6.5. ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE PRIORIZACIÓN	32
6.5.1. ANÁLISIS DE CAMBIO DE HÁBITATS EN EL TIEMPO	32
6.5.2. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN DE HÁBITATS	32
6.5.3. ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD DE PARCHES	33
6.5.4. ANÁLISIS DE CONECTIVIDAD DE HÁBITATS	33
6.5.5. ANÁLISIS DE β -DIVERSIDAD	34
6.5.6. ESPACIALIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LOS USOS	34
6.5.7. DESARROLLO DE ESCENARIOS DE PRIORIZACIÓN	35

7. RESULTADOS	37
7.1. HÁBITATS BENTÓNICOS	37
7.2. DIVERSIDAD	52
7.3. SALUD ARRECIFAL	70
7.4. CAMBIOS TEMPORALES	86
7.5. ANÁLISIS ESPACIAL DE ESCENARIOS DE PRIORIZACIÓN	94
8. DISCUSIÓN	114
9. CONCLUSIÓN	122
10. RECOMENDACIONES	124
11. REFERENCIAS	125
12. ANEXOS	135



RESUMEN

El Arrecife Alacranes es la estructura arrecifal más grande del Golfo de México, declarada Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) en 1994. El fin último de este reporte es la generación de información científicamente validada para el soporte a la toma de decisiones referentes a el ajuste de los polígonos de la zonificación de manejo, como una pieza importante para la actualización del programa de manejo del PNAA. Para lograrlo, se realizaron análisis espaciales y ecológicos utilizando tanto datos satelitales, como datos *in situ* de ensamblajes bentónicos e ícticos. A los resultados obtenidos se aplicó la técnica de priorización de áreas de conservación para proponer una optimización a la zonificación del Parque Nacional Arrecife Alacranes. Se proponen tres escenarios de priorización: escenario A, el cual prioriza el ambiente; el escenario B, el cual prioriza el ambiente y las zonas de uso poco intensivo, y escenario C el cual prioriza el ambiente y las zonas de uso intensivo. A partir de los datos científicos actualizados, se recomienda ampliar los límites de los polígonos de la zona núcleo para que incluya áreas de alta importancia ecológica y minimizar la exposición de estas áreas a los usos de extracción de recursos naturales llevados a cabo en la zona de amortiguamiento.

Palabras Clave: *Áreas Marinas Protegidas, Diversidad, Evaluación de salud arrecifal, Hábitats bentónicos, Zonas de Manejo.*

1. INTRODUCCIÓN

El Arrecife Alacranes es un arrecife de plataforma que se encuentra dentro del Golfo de México y está situado a 140 km de la costa yucateca al norte de Puerto Progreso. Con un área de 300 km², es la estructura arrecifal más grande del Golfo de México (26.7 km de longitud y 14.6 km de ancho). Debido a su importancia ecológica, fue declarada Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) en 1994, Reserva de la Biósfera de la Unesco en 2006 y sitio Ramsar en 2008.

En efecto, este parque nacional es un polo de diversidad marina en el Golfo de México, albergando quince veces más diversidad que la costa de Yucatán (LANRESC, 2021). Se han registrado más de 1600 especies integrando grupos como las aves, los reptiles, los peces, los corales, y otros invertebrados (LANRESC, 2021). Además, es sitio de reproducción para numerosas especies, incluyendo especies de interés comercial como la langosta, sosteniendo así actividades humanas como la pesca y el turismo. Sin embargo, este valioso arrecife está amenazado principalmente por la presión de pesca - particularmente la pesca ilegal-, las actividades turísticas no reguladas y la contaminación (OCEANA, 2022).

Una estrategia para afrontar estas amenazas es generar información científica actualizada en relación con los objetivos y las acciones de manejo del área protegida. En este contexto, entre los supuestos que deben ser revisados se encuentra la pertinencia de la zonificación dentro del PNAA, a través de datos científicos actualizados y diseñados para evaluar el cumplimiento de los objetivos de manejo.

En la actualidad, el PNAA, presenta una zonificación que consta de dos zonas núcleo que suman 31,670 ha y una zona de amortiguamiento de 302,098 ha. Al delimitar estas zonas de manejo, se consideró que en las zonas núcleo del Parque Nacional Arrecife Alacranes estaban presentes los principales ambientes geomorfológicos y bióticos representados tanto por ecosistemas terrestres como marinos, los cuales se encontraban en buen estado de conservación (CONANP, 2006). Mientras que la zona de



amortiguamiento se definió como una zona en la cual los recursos marinos y terrestres si pueden ser aprovechados, pero bajo un esquema sustentable (CONANP, 2006).



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Manejo Integral de la Zona Costera

El manejo integral de la zona costera es un modelo de manejo que tiene su origen en la resolución de conflictos locales entre actores de la zona costera, y en un inicio se basaba en la incorporación de los intereses de todos los sectores de la sociedad en el proceso. Sin embargo, las herramientas disponibles para implementar el manejo de los recursos (desde las evaluaciones de impacto ambiental, hasta los permisos de explotación y cuotas de captura), pueden exacerbar el conflicto, por una parte, asignando permisos a algunos usuarios en detrimento de otros, o por otra simplemente por seguir regulaciones gubernamentales sin tomar en cuenta a la comunidad de usuarios (Forst, 2009).

Holt y Talbot (1978) proponen la adopción de una visión del manejo que integre no solo el ambiente y las especies, sino que permita mantener la funcionalidad del sistema, incluyendo el consumo (y uso) humano, considerando también las variaciones de las condiciones ambientales. Para este tipo de manejo se requiere información del sistema, adquirida a través de evaluaciones y monitoreos cuya frecuencia y alcance debe de estar directamente correlacionada con la intensidad del uso, la complejidad de la problemática y la vulnerabilidad del ecosistema. Con esta información se podrá establecer una capacidad de carga óptima del sistema que permitirá mantener la estructura comunitaria y la función del ecosistema.

Esta planeación espacial de la zona costera tiene la capacidad de mejorar la habilidad de los manejadores de evitar presiones combinadas y acumuladas sobre los ecosistemas y de manejar diferentes presiones al mismo tiempo (Laffoley et al., 2004; Guerry, 2005). Además, desde este enfoque, las prioridades del manejo cambian de la administración de servicios hacia el soporte del potencial de producción de bienes y servicios, y el manejo está basado en información científica. Los temas más importantes por considerar en esta nueva aproximación al manejo son: a) el manejo adaptativo; b) el monitoreo y la

modelación ecológica; c) los indicadores; d) la escala temporal y espacial del manejo; y e) la participación de los usuarios (Forst, 2009).

Efectivamente, el manejo adaptativo es clave, ya que incorpora la revisión de los supuestos de los programas de manejo y facilita la incorporación de nueva información que apoya la obtención de sus objetivos. Adicionalmente, este tipo de manejo provee mecanismos para implementar sobre la marcha los cambios requeridos en las actividades operativas para alcanzar los objetivos de manejo (AID Environment, 2004; Forst, 2009).

2.2. Áreas Marinas Protegidas como Herramientas de Manejo

Las áreas marinas protegidas (AMPs) son herramientas favorecidas por los manejadores de la zona costera como el estándar para limitar actividades extractivas o que conllevan algún detrimento de los recursos naturales (Guerry, 2005). Estas deben de ser diseñadas para abarcar los hábitats principales del ecosistema en cuestión, especialmente cuando se trata de hábitats bentónicos relacionados con especies de interés (AID Environment, 2004; Laffoley et al., 2004).

Las áreas marinas protegidas (AMPs) se han utilizado con éxito, como herramientas de manejo, para conservar y en algunos casos restaurar algunas características de los ecosistemas arrecifales como la biomasa de peces. Tal es el caso de las áreas de exclusión pesquera (refugios pesqueros como se denominan legalmente en México) y existen ejemplos de relativo éxito como Cabo Pulmo en Baja California (Reyes-Bonilla & Álvarez-Filip, 2008; Aburto-Oropeza et al., 2011) y Dry Tortugas en Florida (Ault et al., 2006, 2013).

Sin embargo, la efectividad de estas herramientas depende no solamente del decreto de estas áreas, sino de múltiples factores como el manejo de las actividades humanas dentro y fuera de las AMPs, a través de estrategias de manejo integral, ya que son estas actividades las que en última instancia ponen en riesgo el éxito y disminuyen la

efectividad de estas herramientas. Asimismo, la efectividad de las AMPs depende en gran parte del esfuerzo de vigilancia, y por consecuencia, de la aplicación de las regulaciones establecidas en sus planes de manejo (Suchley & Álvarez-Filip, 2018; Cruz-Vázquez et al., 2019; Ortiz-Cajica et al., 2020).

En el caso de la conservación de los hábitats bentónicos, la cobertura coralina y la estructura tridimensional de los arrecifes coralinos, la importancia del manejo integral es estratégica, ya que los arrecifes coralinos son ecosistemas con alta conectividad entre los ecosistemas adyacentes, y en la actualidad las estrategias de conservación deben estar enfocadas en la eliminación o disminución de las presiones antropogénicas locales, para permitir la preservación de la función y la resiliencia natural de los ecosistemas, en un contexto de amenazas globales relacionadas al cambio climático.

2.3. Zonificación de las Áreas Marinas Protegidas

La zonificación de AMPs es una herramienta de planeación espacial, que integra la designación de áreas para el manejo y usos específicos, dependiendo de la determinación de la aptitud de esa área para esos usos, añadiendo además el propósito de minimizar conflictos entre usos incompatibles. Una zona es un área dentro de un AMP que tiene límites definidos en el programa de manejo y que se identifican por tipos dependiendo del grado de protección requerido en esa área (Agardy, 2010; Kirkman, 2013).

Los aspectos más importantes para tomar en cuenta al implementar una zonificación en una AMP son: una base legislativa robusta para la zonificación, un espectro claramente definido de zonas que se puedan implementar, objetivos explícitos de cada zona, una definición clara de las actividades apropiadas en cada zona, mapas de esta zonificación disponibles al público, y zonificación complementaria con jurisdicciones adyacentes (Day et al., 2018).

2.4. Percepción Remota Satelital

La percepción remota es la manera de registrar datos de algún objeto de estudio sin estar en contacto directo con él. La percepción remota óptica se basa en el registro de energía en rangos que incluyen la luz visible y el infrarrojo, reflejada por la superficie del planeta. Estos registros se traducen en matrices numéricas bidimensionales ordenadas en filas y columnas (rasters), en cuyas celdas se almacena datos numéricos representando el valor de la intensidad de rangos específicos del espectro electromagnético (ERDAS, 1999; Hexagon, 2021).

Estos registros se pueden realizar a través de sensores a bordo de satélites, aviones o drones; y dependiendo de la configuración y propósito de cada sensor, estos registrarán diferentes rangos del espectro electromagnético (bandas o canales, que representan la resolución espectral del sensor) de manera simultánea, que en conjunto formarán una imagen compuesta, la cual representa la realidad de la superficie del planeta en el momento de la captura (Goodman et al., 2013). Dependiendo también de la configuración del sensor y la altura a la cual se capturan los datos, cada celda (o píxel) representará un área determinada de la superficie del planeta, a esta área representada por el píxel se le conoce como resolución espacial, y determina el detalle con el que se pueden observar y analizar los objetos presentes en la superficie del planeta (Goodman et al., 2013).

La serie de satélites Landsat son sensores multiespectrales de resolución media (píxeles de 30x30m) que han colectado datos de la superficie del planeta desde mediados de los años 1970. El Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus) cuenta con 8 bandas, de las cuales 3 abarcan el espectro visible (rojo, verde y azul), útiles para observar y estudiar los ecosistemas de arrecifes coralinos, y también una banda del infrarrojo cercano (NIR), útil para realizar correcciones referentes a la superficie y la columna de agua en estudios marinos. El Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) cuenta con 9 bandas de las cuales 4 abarcan el espectro visible, incluyendo la banda Azul Costero

que mejora las capacidades de observación de fondos marinos, y la banda del Infrarrojo Cercano (USGS, 2022).

2.5. Cartografía Temática Satelital como Herramienta de Manejo

Las capacidades de observación de la tierra a través de los sensores satelitales, nos permiten obtener datos de amplias áreas de la superficie terrestre, por ejemplo, las escenas de los satélites Landsat 7 y 8 abarcan un área de aproximadamente 33,490 km² (USGS, 2022), que en conjunto con un diseño muestral representativo, que registre los datos de interés de nuestro(s) ecosistema(s) directamente en campo, nos permite caracterizar la distribución espacial de los fenómenos de interés y generar cartografía con alta exactitud para el soporte a la toma de decisiones en manejo (Garza-Pérez et al., 2004).

Estos mapas temáticos pueden ser tanto cualitativos, respondiendo a la pregunta ¿Qué está en dónde?, como cuantitativos, respondiendo a la pregunta ¿Cuánto hay en dónde? En el caso de los arrecifes coralinos estos mapas pueden tomar la forma de mapas de hábitat, mapas de distribución de ensamblajes de especies bentónicas y de peces, así como de biomasa de especies de peces (Pittman et al., 2007; Knudby et al., 2011; Arias-González et al., 2012).

Combinando mapas generados a través de insumos del mismo tipo (en este caso imágenes Landsat) y el registro de datos de campo a través de las mismas metodologías en tiempos diferentes, se puede comparar la distribución espacial de hábitats, y porcentajes de cobertura de los componentes del ecosistema arrecifal. Este acercamiento proporciona métricas objetivas del cambio espacial en los ecosistemas y en conjunto con otra serie adicional de indicadores, permiten evaluar la eficiencia de las áreas marinas protegidas en la preservación de sus objetos de conservación.

2.6. Estructura Geomorfológica de Alacranes

La estructura geomorfológica de los arrecifes de plataforma o banco como Alacranes, generalmente tiene influencia de los vientos predominantes, los cuales generan a su vez un clima de oleaje, que moldea la zonación ecológica del arrecife. En la parte de barlovento presentan un frente arrecifal que puede estar o no desarrollado con estructuras de cordilleras y canales. En la plataforma arrecifal de Alacranes, el frente arrecifal está dominada generalmente por extensos jardines de octocorales. La parte más somera y en algunas partes emergida del arrecife es la cresta arrecifal, la cual divide el frente y la laguna arrecifal. En Alacranes la cresta arrecifal está dominado por Acropóridos (*Acropora palmata*, *A. cervicornis* y *A. prolifera*).

Detrás de esta cresta, se encuentra una zona de alta complejidad denominada arrecife posterior, dominada por especies masivas como *Orbicella annularis*, foliosas como *Agaricia tenuifolia*, ramosas como *Porites porites* y algunos Acropóridos. Estas tres zonas arrecifales absorben y disipan casi la totalidad de la energía del oleaje, produciendo una amplia zona de baja energía en la laguna arrecifal, en donde en las planicies más someras se desarrollan camas de pastos marinos y otra vegetación (algas verdes principalmente).

El resto de los ambientes de las lagunas arrecifales se definen por una parte por su profundidad, y pueden tener decenas de metros de profundidad o estar muy cercanos a la superficie. Otro factor estructural es la disponibilidad de sustratos duros, que en conjunto con la producción y transporte de sedimentos dentro del arrecife (de las partes más someras a las más profundas), producen estructuras similares a pequeños atolones, columnas o mesetas, festoneados por estructuras coralinas -generalmente más desarrolladas en los bordes. Dichas estructuras tienden a desarrollar reticulaciones que con el tiempo modifican la circulación del agua y el transporte de sedimentos produciendo a su vez diferentes tipos de acreción en las estructuras coralinas. En estas zonas existen la mayoría de las formas de crecimiento de los corales desde los corales foliosos y

ramosos cerca de la superficie, pasando por los corales masivos, cerebros e incrustantes más profundos.

Una vez que se atraviesa la plataforma, en la parte de sotavento, generalmente existen rampas o pendientes en donde se desarrollan estructuras coralinas de alta complejidad, muchas veces en estructuras de cordilleras y canales, ya que cuentan con la completa protección del oleaje, vientos y corrientes dominantes. En estas zonas más profundas abundan los corales masivos y sus formas de crecimiento tipo plato. En esta gran variedad de ambientes presentes en el Arrecife Alacranes, no solo varía la composición y condición de la comunidad bentónica, pero también cambian los ensamblajes de peces arrecifales, adaptándose a los factores ambientales y al tipo y disponibilidad de refugio y alimento.



3. ANTECEDENTES

Los estudios modernos publicados para Arrecife Alacranes datan de 1960, los cuales caracterizan los ambientes sedimentarios del arrecife y algunos de los procesos de acreción de la plataforma (Folk & Robles, 1964; Folk, 1967; Logan, 1969; Macintyre et al., 1977; Novak, 1992; Novak et al., 1992) que establecen que la mayor parte de los sedimentos son de origen coralino (~45-60%) y otra fracción significativa (10-20%) están compuestos por discos de *Halimeda spp.* Estos mismos estudios establecen que la mayor parte de la acreción vertical de la plataforma (últimos 14,000 años) se dio a través de la acumulación de clastos de especies de Acropóridos.

Los estudios de caracterización de los ensamblajes coralinos se comienzan a formalizar con Zlatarski (1984), Chávez & Hidalgo (1988), Liddell & Olhorst (1988) y continúan a finales de los años 1990 y principios de los años 2000, con trabajos enfocados en la descripción de paisajes arrecifales (Membrillo-Venegas, 1999), mapeo de tipo de fondos (Bello-Pineda, 1998; Bello-Pineda & Liceaga-Correa, 1998), la caracterización de ensamblajes de peces arrecifales (González-Gándara, 2001) y batimetría satelital (Liceaga-Correa & Euán-Ávila, 2002). La mayoría de estos estudios se utilizaron como base para la generación del programa de manejo del PNAA (CONANP, 2006). Precisamente los estudios para el decreto de Arrecife Alacranes como un área marina protegida (Reserva de la Biósfera) comienzan en 1993 (De la Cruz et al., 1993).

Posteriormente se realizan estudios más aplicados como Garza-Pérez (2004) con predicción espacial de hábitats y Garza-Pérez et al., (2004) con el diseño de un área marina protegida a través de predicción espacial. También González-Gándara y Arias-González (2004), quienes analizaron los ensamblajes de Pomacéntridos, y Bello-Pineda et al., (2005a) quién utilizó video aéreo para mejorar la clasificación de hábitats arrecifales. Los estudios relacionados a especies de interés comercial en Arrecife Alacranes son también diversos, e integran estudios de las agregaciones reproductivas de meros (Tuz-Sulub et al., 2003, 2006; Tuz-Sulub, 2008; Tuz-Sulub & Aguilar-Perera, 2012; Tuz-Sulub & Brulé, 2015); la evaluación espacial de stocks de *Panulirus argus*

(Bello-Pineda et al., 2005b); y estudios de modelación de impactos en la comunidad de peces arrecifales por la invasión de pez león *Pterois volitans* (Arias González et al., 2011).

En términos de la metodología de esta propuesta, las bases para este tipo de análisis en arrecifes coralinos datan de 2006 (Harborne et al., 2006), estudio que cuantifica la β -diversidad, es decir el reemplazamiento de especies a lo largo de gradientes espaciotemporales en los ecosistemas, para así entender y conservar los patrones de biodiversidad. En 2008, Rioja-Nieto & Sheppard realizan una evaluación del efecto del manejo del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC), comparando la estructura espacial de los hábitats bentónicos entre zonas bajo regímenes de manejo y zonas adyacentes sin manejo. En esta aproximación se utilizaron mapas de hábitats generados a través de imágenes de satélite, técnicas de percepción remota y cálculos de β -diversidad.

Posteriormente, se realizan adiciones a esta técnica (Rioja-Nieto et al., 2013), integrando la métrica de paisaje de compactación para la selección de áreas de conservación prioritarias en Baja California Sur. Finalmente, estudios más recientes integran métricas de paisaje adicionales, como el análisis de cambio temporal de hábitats, la conectividad entre parches y la espacialización de la intensidad de uso, para la priorización espacial de áreas de conservación en áreas marinas protegidas (Ortiz-Cajica et al., 2020).

4. JUSTIFICACIÓN

El Parque Nacional Arrecife Alacranes -PNAA- decretado en 1994, como Parque Marino y re-categorizado en 2000. El PNAA es una herramienta de manejo que tiene como objetivo general *“Conservar, proteger y recuperar los ecosistemas del parque nacional arrecife Alacranes y sus elementos, a través de un adecuado manejo y administración del mismo, con la participación de los sectores gubernamentales y sociales de la región involucrados en el área”* (CONANP, 2006).

Y entre sus objetivos específicos se encuentran:

- *Permitir la continuidad de los procesos biológicos y evolutivos dentro de los ecosistemas insulares y marinos del Parque Nacional Arrecife Alacranes.*
- *Conservar los recursos naturales del parque nacional, con énfasis en las especies endémicas, las amenazadas, en peligro de extinción, protección especial y aquellas de importancia económica actual y potencial; así como proteger las comunidades y sus ecosistemas.*
- *Promover la conservación de la biodiversidad marina y la productividad biológica al interior del parque, que permita la continuidad e interacciones de dichas especies.*

Para este fin, una de las principales herramientas del Área Marina Protegida -contenida en el decreto de 1994-, y que se toma en cuenta en el Plan de Manejo publicado en 2006 (CONANP, 2006), es el establecimiento de una zonificación espacial del parque (**Figura 1**). Sin embargo, debido a los múltiples estresores que han actuado sobre el arrecife Alacranes en las últimas 3 décadas, se estima que tanto el Plan de Manejo, como la zonificación del parque requieren de una evaluación y muy probablemente una actualización.

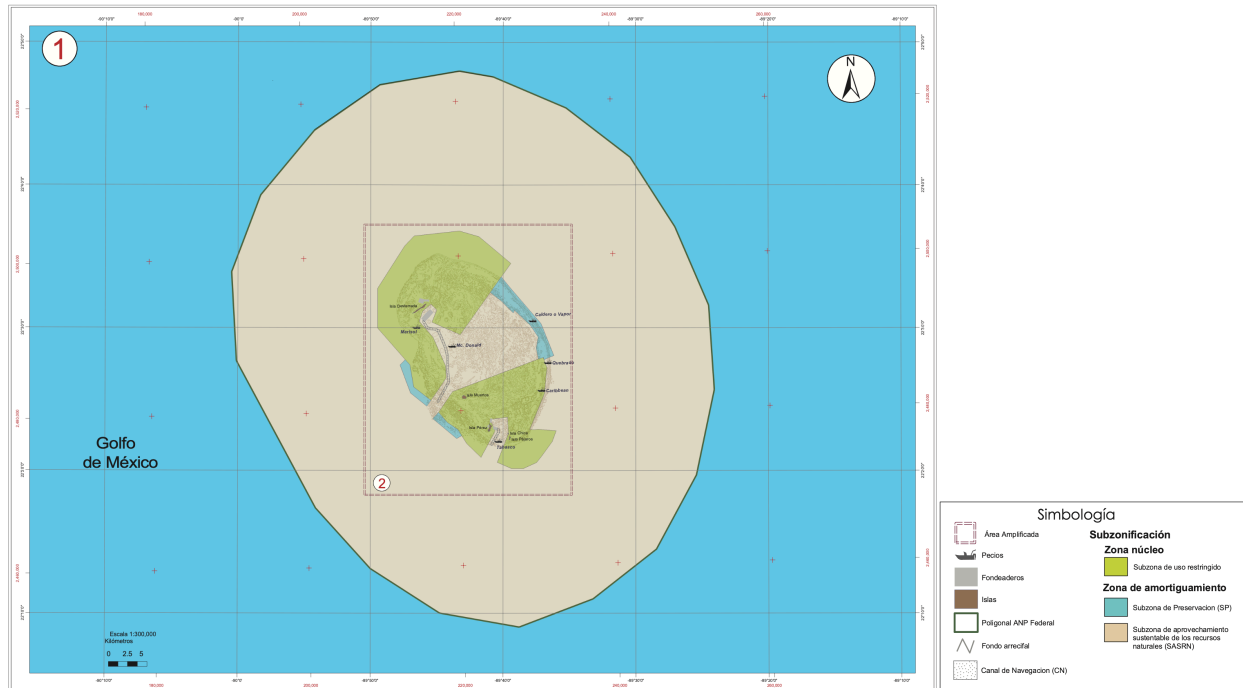


Figura 1. Zonificación Actual del Parque Nacional Arrecife Alacranes (Fuente: CONANP, 2006).

El presente estudio se enmarca en dos campañas de monitoreo ecológico financiadas por OCEANA para fomentar la protección de santuarios marinos como el PNAA y reforzar su adecuado manejo. El fin último de este reporte es la generación de información científicamente validada para el soporte a la toma de decisiones referentes a el ajuste de los polígonos de la zonificación de manejo, como una pieza importante para la actualización del programa de manejo del PNAA.

5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

Las principales preguntas de investigación son:

1. ¿Cómo han cambiado los tipos de fondo del Arrecife Alacranes en 22 años?
2. ¿La configuración espacial actual de los tipos de fondo del Arrecife Alacranes está en concordancia con la zonificación espacial del Parque Nacional Arrecife Alacranes?

Para contestar estas preguntas, se establecen tanto el objetivo general de este proyecto como los objetivos específicos. El objetivo general es aplicar la técnica de priorización de áreas de conservación (Ortiz-Cajica *et al.*, 2020) a los datos de comunidades bentónicas del Arrecife Alacranes, actualizados a 2022, para proponer una optimización a la zonificación del Parque Nacional Arrecife Alacranes.

De este objetivo, derivan objetivos específicos:

1. Caracterizar los comunidades bentónicas y ensamblajes de peces del Arrecife Alacranes.
2. Generar cartografía de tipos de fondo, conectividad, β -diversidad, distribución de peces y condición arrecifal.
3. Evaluar el cambio en la distribución espacial de los tipos de fondo entre 2000 y 2022.
4. Analizar la congruencia de la zonificación espacial actual del PNAA con los hotspots de cambio y condición arrecifal identificados.
5. Generar recomendaciones y una propuesta de zonificación actualizada del PNAA.

6. MÉTODOS

6.1. Área de Estudio

El arrecife Alacranes es un arrecife de tipo plataforma o banco en el Banco de Campeche, situado frente a la costa de Puerto Progreso Yucatán, a una distancia de 140 km hacia el norte de la costa del estado de Yucatán, entre las coordenadas 22°21' a 22°34' latitud norte y 89°36' a 89°47' longitud Oeste. Presenta una forma semi-elíptica orientada en dirección NNO – SSE, su extensión es de 27 x 15 km aproximadamente (**Figura 2**).

Es un sistema arrecifal de estructura geomorfológica altamente compleja, posee una cresta arrecifal conspicua desarrollada a barlovento y en la zona de sotavento no existe una delimitación continua entre la laguna y la pendiente arrecifal. La parte interna es una laguna arrecifal en donde se encuentran presentes varios hábitats asociados a una formación reticulada de parches coralinos.

Dentro del sistema arrecifal se encuentran cinco islas localizadas en la porción de sotavento: Desterrada, Muertos, Pérez, Chica y Pájaros. Y el fondo en la mayor parte de la laguna se encuentra cubierto por sedimento carbonatado: arcilla, arena y pedacería de coral (Kornicher & Boyd 1962; Hildebrand et al., 1964; Bonet, 1967; Chávez & Hidalgo, 1988; De la Cruz et al., 1993a, 1993b; Bello-Pineda, 1998, Membrillo-Venegas, 1999; González-Gándara, 2001).

6.1. Diseño Muestral

El diseño muestral se implementó a través del análisis visual de imágenes de satélite de alta resolución y la aplicación de conocimiento experto, tomando en cuenta las diferentes zonas ecológicas del arrecife para tener una representatividad estadística. Esto permitió caracterizar de manera robusta estos ambientes, evaluarlos e identificar hotspots de diversidad y abundancia de organismos bentónicos y de peces, así como una representatividad en tipos de fondo que pudieran discriminarse a través de datos

satelitales, y así generar cartografía de tipos de fondo, distribución de peces y condición arrecifal.

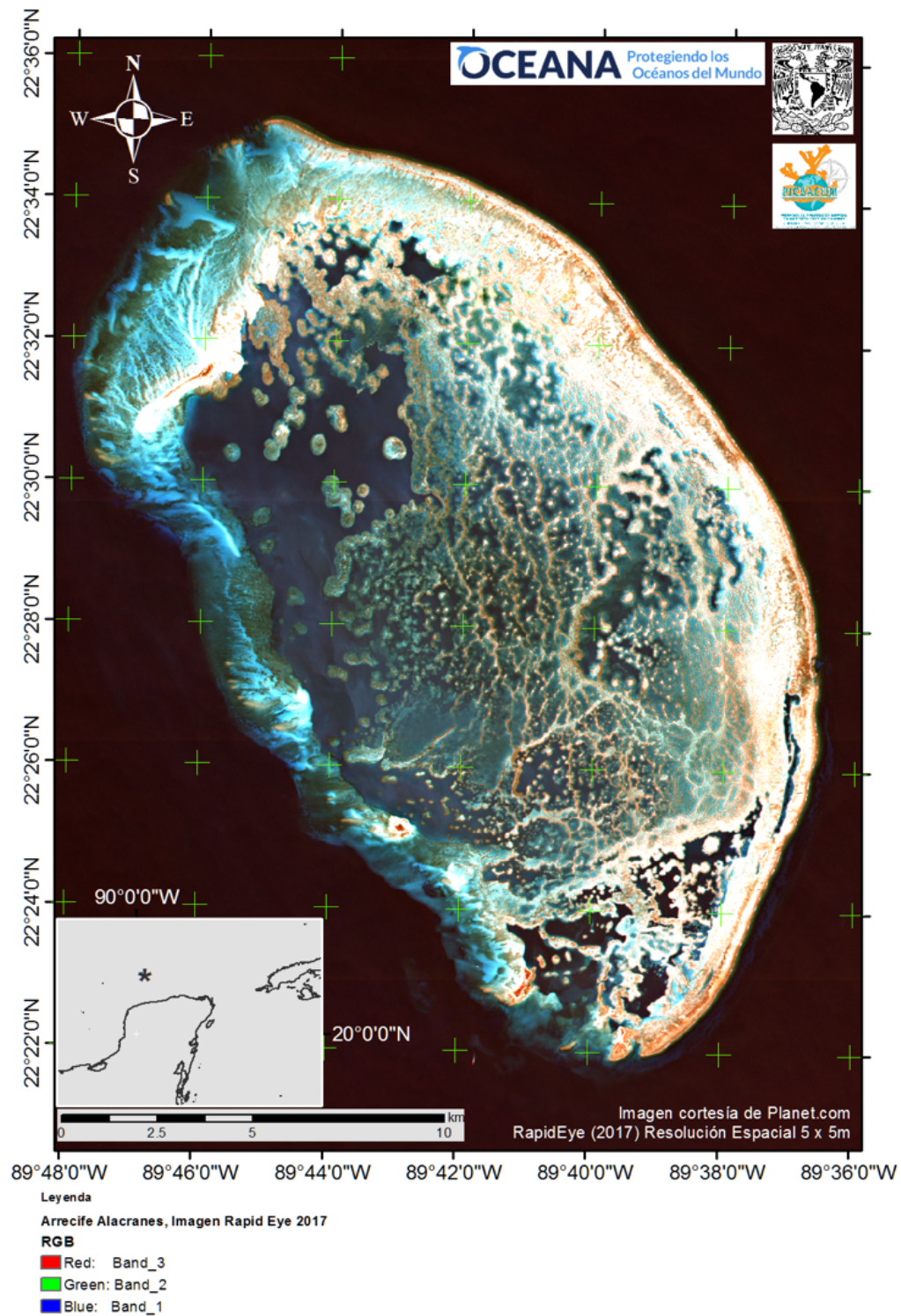


Figura 2. Área de estudio en el Arrecife Alacranes, Yucatán México. Localizado en el Golfo de México al norte de la Península de Yucatán.

De igual manera se tomó en cuenta tanto la logística de campo, el acceso a través de embarcaciones a los sitios propuestos y los recursos disponibles durante la expedición. La colecta de datos se realizó en 111 sitios (**Figura 3**), localizados en las zonas de amortiguamiento y núcleo, la cual se divide en zona núcleo norte y zona núcleo sur (**Tabla 1**).

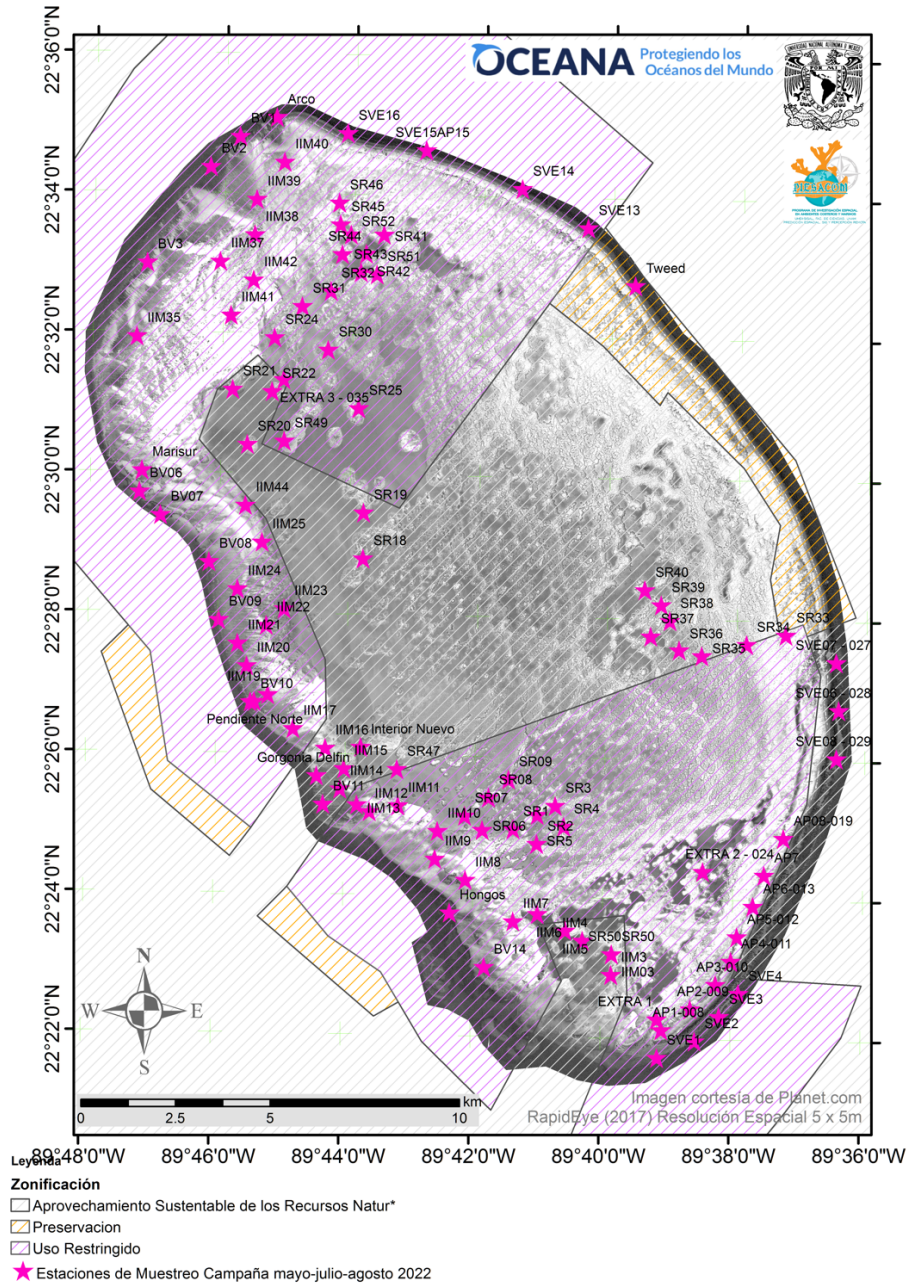


Figura 3. Diseño muestral. Localización de las 111 estaciones visitadas durante las campañas de mayo y julio-agosto de 2022 en la plataforma arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes y zonificación del parque.

Tabla 1. 111 sitios monitoreados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes en 2022.

	Zona de manejo	Sitio	Zona UTM	Easting	Northing	Profundidad Promedio (m)
1	Zona de Amortiguamiento	BVE6		231707	2484483	15.7
2		BVE7		231643	2485744	13.4
3		BVE8		231639	2483204	16.2
4		GD		217896	2482786	5.9
5		IIM14		218515	2482439	4.4
6		IIM15		218626	2482973	4.5
7		IIM16		218131	2483514	3.9
8		IIM3		225678	2477513	1.1
9		IIM3b		225644	2477519	1.5
10		IIM4		224924	2478416	2.1
11		IIM5		224471	2478680	1.2
12		IN		219231	2483478	2.0
13		SR18		219133	2488511	2.0
14		SR19		219147	2489725	2.1
15		SR20		216076	2491539	2.7
16		SR21		215690	2492996	1.6
17		SR22		216733	2492932	2.0
18		SR34		229270	2486225	1.5
19		SR35		228086	2485930	2.2
20		SR36		227489	2486083	1.5
21		SR37		226735	2486447	0.7
22		SR38		227243	2486854	1.4
23		SR39		227015	2487273	0.8
24		SR40		226583	2487671	1.0
25		SR47		220024	2482950	2.1
26		SR50		225691	2478054	6.5
27		SR50b		225702	2478063	6.0
28		SV11		218066	2482035	9.6
29		TW		226340	2495702	6.0
30	Zona Núcleo Norte	AP15		220817	2499294	1.4
31		BVE13		225093	2497231	10.7
32		BVE14		223355	2498271	9.2
33		BVE15		220817	2499294	11.0
34		BVE16		218746	2499746	6.8
35		CA		216867	2500161	6.8
36		EX3		217040	2493248	2.5
37		IIM17		217281	2484033	4.0
38		IIM18		217415	2484360	1.3
39		IIM19		216615	2484932	1.2
40		IIM20		216056	2485694	5.2
41		IIM21		215815	2486291	5.6
42		IIM22		216577	2486761	4.2
43		IIM23		217047	2487193	4.0
44		IIM24		215815	2487726	5.8
45		IIM25		216463	2488958	4.0
46		IIM35		213161	2494406	3.2
47		IIM37		215371	2496375	2.4
48		IIM38		216285	2497073	2.0
49		IIM39		216336	2498013	2.3
50		IIM40		217072	2498991	3.5

Tabla 1. Continuación.

	Zona de manejo	Sitio	Zona UTM	Easting	Northing	Profundidad Promedio (m)	
51	Zona Núcleo Norte	IIM41		215650	2494952	1.6	
52		IIM42		216247	2495879	1.4	
53		IIM44		216026	2489929	4.5	
54		MA		212837	2490852	11.2	
55		PN		216253	2484750	6.6	
56		SR24		216804	2494353	1.5	
57		SR25		219018	2492482	0.9	
58		SR30		218218	2494025	1.2	
59		SR31		217533	2495182	1.2	
60		SR32		218290	2495582	1.3	
61		SR41		219695	2497062	1.1	
62		SR42		219226	2496560	0.8	
63		SR43		219086	2496074	1.3	
64		SR44		218592	2496551	1.1	
65		SR45		218550	2497334	1.1	
66		SR46		218517	2497910	0.5	
67		SR49		217052	2491622	2.6	
68		SR51		219505	2496015	1.2	
69		SR52		218827	2497069	5.1	
70		SV1		215903	2499671	7.5	
71		SV10		216154	2484741	8.0	
72		SV2		215123	2498881	10.8	
73		SV3		213444	2496353	8.3	
74		SV6		213226	2490305	12.3	
75		SV7		213784	2489689	18.9	
76		SV8		215062	2488446	8.9	
77		SV9		215317	2486913	9.6	
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	BVE1			226889	2475320	14.7	
87	BVE2			227884	2475753	18.9	
88	BVE3			228527	2476400	17.1	
89	BVE4			229043	2477010	17.2	
90	EX1			226884	2476335	1.2	
91	EX2			228106	2480234	0.8	
92	HO			221412	2479165	16.4	
93	IIM10			221094	2481317	4.1	
94	IIM11			220051	2481994	1.2	
95	IIM12			219298	2481839	1.7	
96	IIM13			218962	2482018	5.0	
97	IIM6			223737	2479120	2.0	
98	IIM7			223088	2478929	1.3	
99	IIM8			221828	2480025	3.7	
100	IIM9		221028	2480582	5.8		

Tabla 1. Continuación.

	Zona de manejo	Sitio	Zona UTM	Easting	Northing	Profundidad Promedio (m)
101	Zona Núcleo Sur	SR1		223094	2481365	1.3
102		SR2		223734	2481741	0.8
103		SR3		224210	2481976	1.4
104		SR33		230310	2486472	0.9
105		SR4		224435	2481426	3.9
106		SR5		223717	2480973	2.9
107		SR6		222282	2481342	2.2
108		SR7		221812	2481718	2.8
109		SR8		222451	2482201	2.3
110		SR9		222976	2482675	1.2
111		SV14		222320	2477723	8.4

6.2. Colecta de Datos

En cada uno de los 111 sitios, se colectaron datos de los componentes bentónicos e ícticos en un transecto de 50 m de largo. Los datos bentónicos fueron obtenidos a través de un video transecto de 50 m de largo por 0.6 m de ancho (30 m²) y los datos de peces fueron adquiridos a través de censos visuales en un transecto de 50 m de largo por 2 de ancho (100 m²).

Los censos visuales permitieron colectar datos sobre la diversidad de especies de peces, su abundancia y una estimación de su talla en cada sitio visitado. Con estos datos se calcularon biomásas por especie y por grupo trófico (herbívoros, invertívoros, omnívoros, carnívoros y depredadores topos).

Los video transectos de cada sitio se grabaron con cámaras GoPro 8 configuradas a una resolución de 1080p y 30fps. Estos se procesaron para caracterizar cada sitio y obtener la cobertura de los principales grupos morfofuncionales bentónicos, como los corales duros, las algas costrosas, las algas césped, las cianobacterias, las macroalgas, los octocorales, las esponjas, entre otros. También se determinó por sitio la cobertura y la condición (enfermedades, blanqueamiento y mortalidad) de las diversas especies de corales duros, constructores del arrecife coralino.

6.3. Análisis Geográfico Primario

Para este análisis se utilizaron diferentes softwares de análisis estadístico (Primer v.6, E-Primer Ltd.), Sistemas de Información Geográfica (ArcMap v.10, ESRI Inc.) y de procesamiento de imágenes (ENVI v.5.4, Excelis).

6.3.1. Generación de Esquemas de Clasificación

Los valores de cobertura de componentes arrecifales (corales duros, octocorales, pastos marinos, algas, esponjas, etc.) y de sustratos desnudos (arena, cascajo) obtenidos a través de la revisión de los 111 video transectos colectados en campo durante mayo, julio y agosto del 2022 (Tiempo 2 o T2), se incorporaron en un análisis aglomerativo jerárquico, utilizando la métrica de similitud de Gower, para generar un dendrograma y facilitar la selección de grupos de sitios altamente relacionados. Estos grupos de sitios de muestreo fueron comparados entre sí, tomando en cuenta las coberturas promedio de los componentes bentónicos y su ubicación espacial en la plataforma del PNAA para refinar los grupos y definir los hábitats a los cuales representan.

Se utilizaron las descripciones y localizaciones de paisajes arrecifales publicadas por Bello-Pineda (1998) y por González-Gándara (2000), para generar un esquema de clasificación de tipos de fondo, aplicable a una imagen de satélite histórica del año 2000 (Tiempo 1 o T1) y comparable en términos de composición y proporción de coberturas con el esquema de clasificación definido para 2022. Los sitios de entrenamiento se posicionaron en la imagen a través de conocimiento experto y con el apoyo de las fuentes bibliográficas, incluyendo de igual manera sitios representativos de los diferentes fondos de arena a distintas profundidades.

6.3.2. Cartografía Temática de Hábitats

Para llevar a cabo el análisis de priorización es necesario contar en primera instancia con mapas temáticos de los tipos de fondo (hábitats) presentes en la plataforma del PNAA en dos tiempos.

El tiempo 1 (T1) se considera el año 2000, ya que existe bibliografía publicada al respecto, con registros geográficos útiles. De la misma manera, para este año se pudo conseguir una imagen de satélite histórica tipo Landsat 7, con resolución espacial de 30x30m por píxel, del 24 de febrero de 2000, cortesía del programa Landsat (USGS, 2021) limpia de nubes, oleaje y turbidez.

Para el tiempo 2 (T2, verano de 2022), se hicieron múltiples búsquedas en los repositorios de acceso público como los del USGS para imágenes de los satélites Landsat 8 y 9, y la Agencia Espacial Europea -ESA- consultando las imágenes tipo Sentinel-2, así como en repositorios privados (Planet.com, con imágenes PlanetScope), en los cuales se exploraron y analizaron los productos disponibles para el período desde el primero de enero del 2021 hasta el 31 de octubre del 2022. Después de encontrar algunos productos tanto Landsat 8 y 9, como PlanetScope, que cumplieran con las condiciones mencionadas arriba (ausencia de nubes, olas y turbidez), se realizaron pruebas de construcción de mosaicos y se exploró la homogeneidad espectral de los productos aplicando pre-procesamientos. Sin embargo, a partir de estas fuentes de datos no se logró generar ningún producto con la calidad espectral y la continuidad espacial necesaria para cubrir de manera óptima toda la plataforma del PNAA.

Debido a esta dificultad en conseguir un insumo óptimo para el T2, se decidió utilizar una imagen de archivo tipo RapidEye, con resolución espacial de 5x5m por píxel (cortesía de Planet.com, del 19 de noviembre de 2017), ya que presentaba las características óptimas de cobertura del área de estudio (la plataforma completa del Arrecife), sin olas, nubes o turbidez.

A estas imágenes se les aplicaron técnicas de pre-procesamiento utilizando el software ENVI 4.7 (Excelis, 2015):

- 1) Recorte de áreas de interés en escenas satelitales.
- 2) Generación de mosaico para unir diferentes escenas (solo RapidEye).
- 3) Corrección radiométrica utilizando los parámetros contenidos en los metadatos de las imágenes.
- 4) Corrección atmosférica utilizando el módulo Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH).
- 5) La corrección del reflejo de sol en la superficie del agua (Deglint) a través de la técnica propuesta por Headley et al. (2005).
- 6) La corrección del efecto de atenuación de la luz en la columna de agua propuesta por Lyzenga (1981).
- 7) Una homogenización del brillo de los píxeles de la imagen a través del filtro Local Sigma de 9-píxeles (Eliason et al., 1990), que permite mantener el grado de detalle y mejorar la información espectral (Nuñez-Morales, 2021; Garza-Pérez y Barrón-Coronel, 2022).

Para la clasificación de hábitats en el T1, se utilizaron las bandas 1 azul costero, 2 azul y 3 verde generadas en el paso 4 y tres bandas generadas en el paso 5 (derivadas de la combinación pareada de las bandas 1, 2 y 3). Esto se realizó en conjunto con un esquema de clasificación de 11 clases representando diferentes tipos de fondo, en 293 sitios (píxeles individuales) definidos a través de conocimiento experto y fuentes bibliográficas (Bello-Pineda, 1998; Bello Pineda & Liceaga Correa, 1988; González Gándara, 2001), utilizando 209 sitios como campos de entrenamiento y 84 sitios como campos de evaluación de la exactitud de la clasificación.

Para la clasificación de hábitats en el T2, después de varias pruebas, se utilizaron únicamente las 3 bandas generadas en el paso 5 derivadas de la combinación pareada de las bandas 1 azul, 2 verde y 4 rojo borde de la imagen RapidEye. Para esta clasificación se generaron 1,338 sitios de entrenamiento (píxeles individuales) a partir de los 111 sitios visitados en campo, y el posicionamiento de sitios representativos de

fondos de arena desnuda presentes a diferentes profundidades en la plataforma arrecifal aplicando conocimiento experto y con apoyo de la imagen satelital. Estos puntos representan 10 clases, con correspondencia ecológica a las del T1, y se dividió este conjunto de sitios en 1003 campos de entrenamiento y 335 como campos de evaluación de la exactitud de la clasificación.

Para la generación de los mapas temáticos de hábitats de T1 y T2, se aplicaron los algoritmos de clasificación supervisada de Maximum Likelihood, Minimum Distance, Mahalanobis Distance, Neural Network y Support Vector Machine a los insumos descritos. Además, a la imagen clasificada de T2 se le aplicó un post-procesamiento conocido como Majority Analysis, para eliminar el ruido en los patrones espaciales de los tipos de fondo en la imagen clasificada. Adicionalmente se generaron las matrices de confusión para las imágenes clasificadas de ambos tiempos, con los sitios designados como campos de evaluación de precisión.

6.4. Análisis de Datos Ecológicos

El análisis ecológico de los datos se realizó utilizando diversas paqueterías de R (R Core Team, 2022) y se dividió en cuatro partes: hábitats bentónicos, diversidad, salud arrecifal y cambios temporales.

6.4.1. Hábitats Bentónicos

En la primera parte, se caracterizaron los nuevos hábitats en función de sus dominancias bentónicas. Además, se clasificaron los componentes bentónicos en componentes positivos (corales duros y algas costrosas incrustantes), componentes neutros (esponjas no invasivas, octocorales, sustrato) y componentes negativos (invertebrados competidores, macroalgas, algas césped y cianobacterias) de acuerdo con el protocolo AGRRA (AGRRA, 2022).

Luego se calcularon por hábitat los promedios de cobertura para cada componente bentónico (positivo, neutro y negativo) y también los promedios de biomasa de peces por grupo trófico y biomasa total. Para integrar los resultados relacionados a hábitats marinos, se realizó un análisis canónico de coordenadas principales (CAP), que proyecta las diferencias bentónicas entre sitios en función de los hábitats y las biomasa de los grupos tróficos de peces. Para cada componente bentónico y cada grupo trófico, se evaluaron las diferencias significativas entre zonas de manejo utilizando pruebas estadísticas de Wilcoxon.

6.4.2. Diversidad

En una segunda parte, se estudió la diversidad de corales y peces. Utilizando datos de abundancia de corales y peces, se sistematizó el número de familias y especies, se identificaron las especies más abundantes, se analizaron rasgos funcionales tanto de corales (siete rasgos asociados al funcionamiento de los arrecifes), como de peces (principalmente su nivel trófico), y se calcularon los índices de Hill de diversidad específica (N_0 que es el número de especies registradas, N_1 es el exponencial del índice de Shannon y es sensible a las especies raras y N_2 que es el inverso del índice de Simpson y es sensible a las especies dominantes).

Los resultados de diversidad, para cada grupo estudiado (corales y peces) se integraron por medio de un análisis canónico de coordenadas principales (CAP), que proyecta las diferencias de abundancia entre sitios en función de los hábitats y los índices de diversidad. También se calcularon por hábitat los promedios y desviación estándar de cada índice de Hill. Además, se analizaron las diferencias significativas entre zonas de manejo para cada índice de diversidad, tanto para corales como para peces, a través de pruebas estadísticas de Wilcoxon.

6.4.3. Salud Arrecifal

En una tercera parte, se examinó la salud de los sitios arrecifales. Para cada sitio, se evaluó la condición de la salud de las colonias de corales observadas, al calcular la afectación del blanqueamiento, la prevalencia de enfermedades, e indicios de eventos de mortalidad reciente y pasada. También se calcularon solo para sitios arrecifales (sin considerar los sitios dominados por pastos marinos), cuatro indicadores de salud tanto bentónicos (cobertura de coral y macroalgas carnosas), como ícticos (biomasas de herbívoros funcionales claves -peces Cirujanos y Loros- y de peces de interés comercial -Pargos y Meros).

Estos cuatro indicadores de salud permiten el cálculo de un índice de salud simplificado (ISA) por sitio (McField et al., 2020). Los sitios con mayor cobertura de corales duros, menor cobertura de macroalgas, mayores biomasas de peces herbívoros y peces comerciales son considerados en mejor estado ecológico y con mayor capacidad para persistir ante cambios (McField et al., 2020). Estos resultados se integraron por hábitat y también por zona de manejo. Además, se analizaron las diferencias significativas entre zonas de manejo para cada indicador de condición e índice de salud, a través de pruebas estadísticas de Wilcoxon.

6.4.4. Cambios Ecológico Temporales

En una última y cuarta parte, se analizaron los cambios de biomasas de especies de peces entre 1998 (4 años después del establecimiento de la zonificación del PNAA) y 2022 (16 años después del establecimiento de la zonificación del PNAA) y se evaluó la influencia de la zonificación del área protegida sobre estos cambios. Este análisis de cambios temporales se realizó a través de un análisis canónico de coordenadas principales (CAP), que proyecta las diferencias entre sitios en función de los años, así como por pruebas estadísticas de Wilcoxon.

6.5. Análisis de Escenarios de Priorización

Para el análisis de priorización se generaron capas de insumos de información geográfica a partir del mapa temático obtenido a través de la clasificación supervisada de la imagen de satélite en 11 tipos de fondo o hábitats del T2. Para los insumos de complejidad, conectividad y β -diversidad se aplicó el algoritmo de selección de límite de clases de Jenks para minimizar la varianza y maximizar las diferencias dentro y entre grupos. En donde los valores por cada categoría fueron: 1 (Alto), 2 (Medio) y 3 (Bajo).

6.5.1. Análisis de Cambio de Hábitats en el Tiempo

Se contrastó el mapa temático del T1 y el mapa temático del T2. Para esto se hizo un re-muestreo de los píxeles del mapa de T2 (5 x 5m/píxel) para transfórmalos a la misma resolución espacial de 30 x 30m /píxel del mapa del T1, y se co-registraron ambas imágenes para que cada uno de los píxeles de ambos tiempos, representaran exactamente la misma área.

Los sitios en los cuales los valores no cambiaron en ambos mapas se consideraron como un valor neutro de cambio (valor 2). Los sitios del T1 que cambiaron hacia clases con menor importancia ecológica en el T2 se le asignó un valor negativo de cambio (valor 3). Mientras que los sitios en el T2 que tuvieron cambios de una clase de menor importancia ecológica a una de mayor importancia ecológica, se le asignó un valor positivo (valor 1).

6.5.2. Análisis de Priorización de Hábitats

Para realizar una prelación de los tipos de fondo en el análisis de priorización, se tomaron en cuenta sus características y funciones ecológicas para la persistencia y resiliencia del arrecife coralino. En el mapa temático de tipos de fondo de T2, a los fondos dominados por corales duros, así como a las camas densas de pastos marinos, se les asignó importancia alta (valor 1), la importancia media (valor 2) se asignó a los fondos con coberturas razonables de coral tanto en la parte somera como en las zonas de barlovento

y sotavento más profundas, y por último la importancia más baja (valor 3) se asignó a los fondos predominantemente compuestos por cascajo, arena y pavimento calcáreo con cobertura coralina pobre, y que en algunos casos cuentan con coberturas dominantes de macroalgas.

6.5.3. Análisis de Complejidad de Parches

La capa temática de complejidad se derivó de los patrones espaciales de los diferentes hábitats o tipos de fondo representados en el mapa temático del T2, basándose en los datos de área y perímetro de cada tipo de fondo, aplicando la ecuación 1:

$$\text{Complejidad} = \frac{0.2p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

p_{ij} = perímetro del parche ij

a_{ij} = área del parche ij

La interpretación que se le da es que los valores más bajos corresponden a sitios más complejos.

6.5.4. Análisis de Conectividad de Hábitats

El mapa temático de tipos de fondo en formato raster (cuadrícula) se transformó a polígonos, que espacialmente representan cada uno de los parches (clusters de píxeles) pertenecientes a un mismo tipo de fondo. Posteriormente, a través del método euclidiano del centroide, se determinó la distancia (euclidiana) entre los centroides de los polígonos que representan parches de cada tipo de fondo. Esto permitió la generación de una capa con los valores de estas distancias euclidianas categorizadas en tres niveles: a) alta conectividad (1), b) conectividad media (2), y c) baja conectividad (3).

6.5.5. Análisis de β -diversidad

Se extrajeron los valores de cada píxel del mapa temático de T2, correspondientes a cada tipo de fondo, para calcular la disimilitud, y posteriormente calcular los valores de β -diversidad por píxel, aplicando una ventana de 0.25 km², siguiendo el método Harborne et al. (2006) y modificado por Rioja-Nieto & Sheppard (2008). Los valores calculados de β -diversidad también se categorizaron en tres niveles: a) alta β -diversidad (1), b) β -diversidad media (2), y c) baja β -diversidad (3).

6.5.6. Espacialización de la Intensidad de los Usos

Se realizó un ejercicio de consulta participativa con actores claves (personal del Parque Nacional Arrecife Alacranes y otros usuarios que desean permanecer anónimos), a quienes se proporcionaron 4 mapas de la plataforma arrecifal, con una cuadrícula de referencia superpuesta con celdas de 1x1km. Cada mapa tiene un título referente a uno de los usos definidos en colaboración con autoridades de la CONANP: a) uso pesquero comercial, b) uso pesquero deportivo, c) uso turístico y de visitación (incluyendo buceo), y d) uso por pesca furtiva. Para cada uno de estos usos se definió una escala de 4 niveles: a) alta intensidad; b) intensidad media; c) baja intensidad, y d) ausente.

El ejercicio consistió en que cada participante identificara, de acuerdo con su conocimiento y experiencia, las celdas de la cuadrícula de referencia sobre la imagen de satélite que considerara que tienen presencia del uso especificado en el título del mapa, y marcara con color rojo (intensidad alta), amarillo (intensidad media) y verde (intensidad baja), entendiéndose que las celdas sin color serían las que no tienen presencia de ese uso.

Una vez que se obtuvieron los mapas marcados por parte de los participantes, se procedió a integrar en un sistema de información geográfica áreas e intensidades en un solo mapa final para cada tipo de uso. Para incorporar la intensidad de uso se aplicó al mapa anterior una ponderación referente a la importancia de los diferentes usos: a)

pesca furtiva 40%, b) pesca comercial y deportiva 25% cada una, y d) turismo 10%. Estos valores de ponderación obedecen a la gravedad del impacto, ya que la pesca furtiva daña mediante la extracción de organismos tanto al ambiente, como al acceso a los recursos por usuarios concesionados (cooperativas pesqueras) y la sociedad en general, contribuyendo al fenómeno de la tragedia de los comunes. La pesca comercial concesionada y la pesca deportiva tienen un efecto adverso en el ambiente a través de la extracción de organismos, pero están contempladas en el programa de manejo del PNAA. El turismo, que incluye actividades de visitación, buceo y navegación, al no contemplar actividades de extracción se considera la actividad menos dañina.

Después se generó un mapa intermedio en donde se sumaron espacialmente la presencia de intensidades de uso: los sitios en donde coinciden intensidades con el valor máximo (3), se les asignó un valor de 1, equivalente a alta prioridad de conservación. Mientras que aquellos sitios donde coinciden dos usos o más, pero con distintos valores de intensidad obtuvieron valores menores a 3 pero mayores a uno, por ello se le asignó un valor de 2, correspondiente a una prioridad de conservación media. Finalmente, en sitios en los que solo incide un uso por lo tanto los valores son menores a 1 se asignó el valor 3 equivalente a un sitio con baja prioridad de conservación. Con esta información, relativa a la presencia e intensidad de los usos ponderada por el tipo de uso, se generó un mapa final cuyos valores se dividieron en una escala de prioridad del 1 al 3.

6.5.7. Desarrollo de Escenarios de Priorización

La priorización de áreas para la conservación debe de considerar diferentes opciones y aproximaciones, sobre todo cuando existe la apropiación de los recursos naturales. Al respecto se generaron tres escenarios de priorización descritos a continuación, a partir de los cuales se obtuvieron insumos de información geográfica relativa a la priorización de áreas, cuyos valores fueron categorizados en tres niveles de prioridad: 1 es prioritario, 2 es prioridad media y 3 es prioridad baja.

El Escenario A consiste en priorizar únicamente las zonas de conservación sin incluir los datos de intensidad de usos. Es decir, asignando alta prioridad 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 (β -diversidad, complejidad, conectividad y cambio) con 15%.

El Escenario B consiste en priorizar tanto el ambiente, como los usos poco intensos. En esta priorización la estructura del hábitat tiene un valor de ponderación de 40%, el de cambio de T1 a T2, β -diversidad, complejidad y conectividad tienen un valor de 10%, mientras que el insumo de intensidad de usos tiene un 20%. Los niveles de prioridad de cada insumo son iguales que en el escenario anterior, excepto en el insumo de uso, en el cual la prioridad alta se otorga a las áreas con menor cantidad e intensidad de usos, es decir de manera inversa a lo mencionado en la sección anterior de espacialización de la Intensidad de los usos.

El Escenario C consiste en priorizar tanto el ambiente, como los usos más intensos. Corresponde a la aproximación tradicional de priorización espacial (como se describe en la sección de espacialización de la intensidad de los usos) en donde las zonas definidas con mayor presencia e intensidad de uso tienen la prioridad más alta del insumo. Y las otras capas (insumos) se definen con la escala de prioridades mencionada anteriormente (estructura del hábitat con valor de ponderación de 40%, cambio de T1 a T2, β -diversidad, complejidad y conectividad con 10%, e intensidad de usos con 20%).

7. RESULTADOS

7.1. Hábitats bentónicos

Esquemas de Clasificación

Los dendrogramas basados en diferenciaciones bentónicas entre los sitios monitoreados en el en el año 2000 (**Figura 4**) y en el año 2002 (**Figura 5**) permitieron la clasificación de los sitios en clases representando los hábitats bentónicos marinos presentes en el PNAA. Combinando estos resultados y los porcentajes de coberturas de las estaciones de cada grupo se definieron las 11 clases (C1 a C11) representando los diferentes tipos de fondo o hábitats presentes en la plataforma arrecifal para el tiempo 1 (T1) en 2000 y el tiempo 2 (T2) en 2022 (**Tabla 2** y **Tabla 3**).

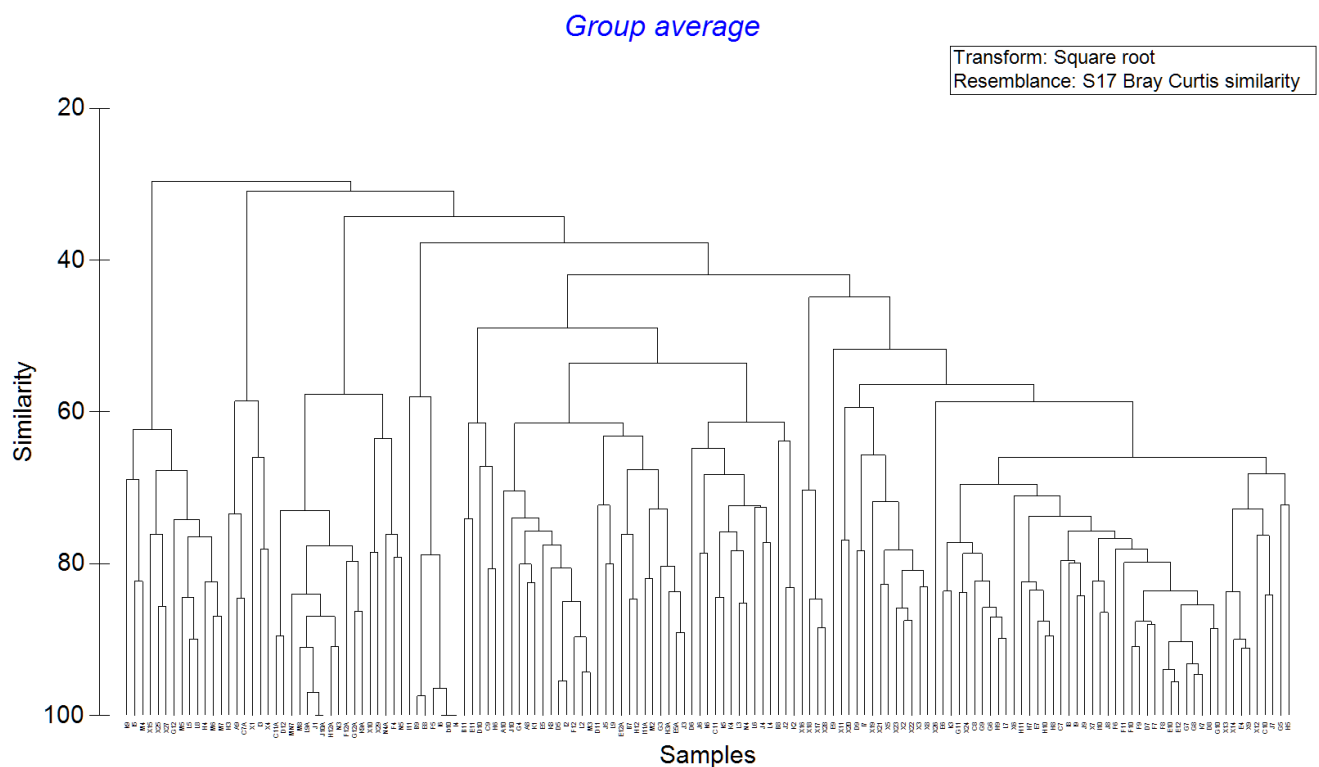


Figura 4. Dendrograma generado a través del análisis aglomerativo jerárquico de las coberturas bentónicas de sitios visitados en el 2000.

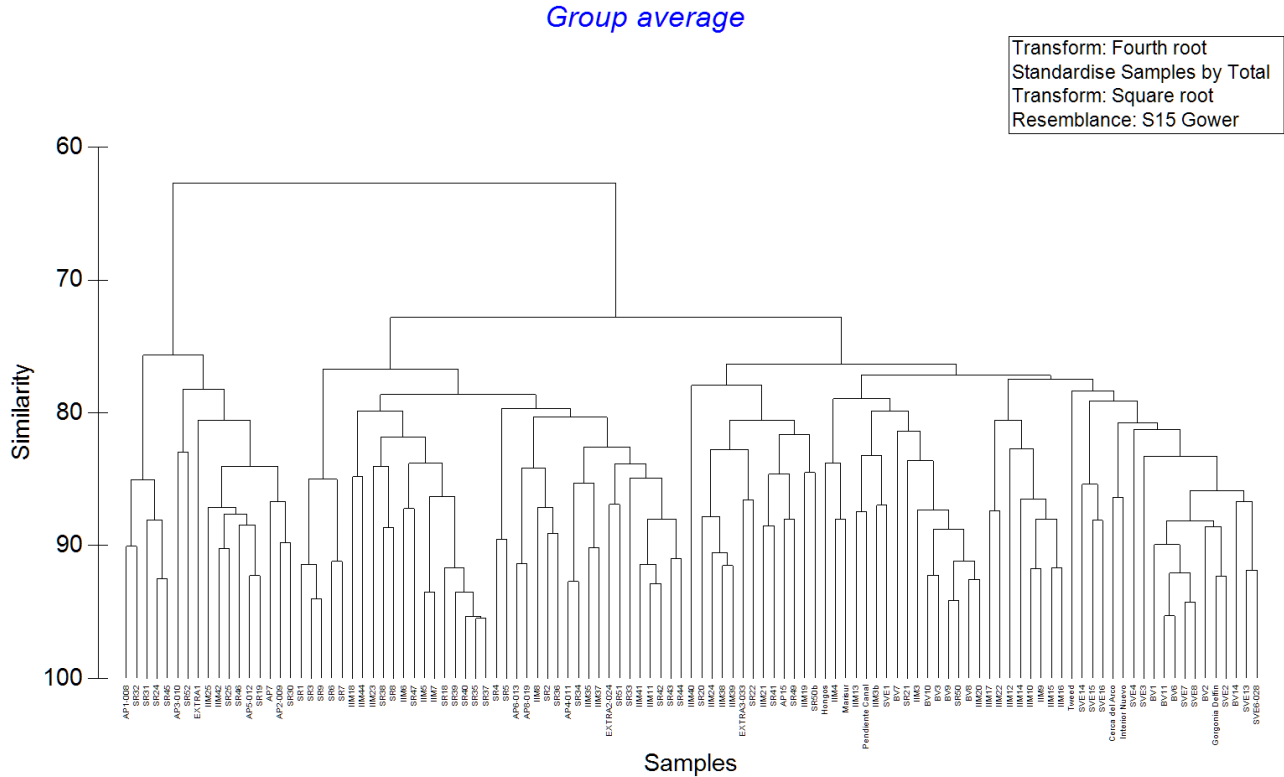


Figura 5. Dendrograma generado a través del análisis aglomerativo jerárquico de las coberturas bentónicas de sitios visitados en el 2022.

Mapas de Hábitats Bentónicos

El mapa de tipos de fondo o hábitats para el año 2000 (Tiempo 1 o T1), contiene 11 hábitats bentónicos (**Figura 6**). La proporción de tipos de fondo de la plataforma arrecifal en ese tiempo, nos indica una proporción de 13.59% de fondos de alta importancia ecológica (C1 camas de pastos marinos densas, C8 y C10 fondos con buenas coberturas de coral duro), mientras que los fondos arenosos y de cascajo, de baja importancia abarcan un 54.42%, y los fondos de importancia media, con coberturas mixtas de corales, octocorales, esponjas y macroalgas abarcan un 31.99% (**Figura 7**). La exactitud general de la imagen clasificada para el T1 es de 78.47%, con un coeficiente de Kappa de 0.77.

El mapa de tipos de fondo o hábitats para el año 2022 (Tiempo 2 o T2), contiene 10 hábitats bentónicos (**Figura 8**). La proporción de tipos de fondo en la plataforma del

arrecife Alacranes nos muestra que los fondos con mayor importancia ecológica (C1 camas de pastos marinos densas, C8 y C10 fondos con buenas coberturas de coral duro) cubre el 12.07% de la plataforma, mientras que los fondos arenosos y de cascajo, que son de baja importancia ecológica (C6 fondos de cascajo con cobertura pobre de coral, y C11 Arenales) abarcan un 56.90% (**Figura 9**). El 31.03% restante son fondos de coberturas mixtas de coral duro, octocorales y macroalgas de importancia ecológica media (**Figura 9**). La exactitud general de la imagen clasificada para el T2 es de 74.02%, con un coeficiente de Kappa de 0.73.



Tabla 2. Coberturas promedio por tipo de hábitat para el año 2000. C1, Camas densas de pastos marinos; C2, Parches coralinos en pastizales; C3, Estructuras a barlovento dominadas por macroalgas; C4, Arrecife frontal dominado por octocorales y cobertura razonable de coral; C5, Arrecife frontal dominado por macroalgas con cobertura pobre de coral; C6, Planicies de cascajo y arena con algas y cobertura pobre de coral; C7, Estructuras con cobertura razonable de coral y octocorales; C8, Estructuras dominadas por coral (cobertura buena); C9, Praderas de macroalgas; C10, Estructuras coralinas (cobertura razonable) dominadas por algas césped; C11, Arenales y camas de cascajo con cobertura bentónica escasa.

Clase	CoralDuro	HidCor	Octocor	Esponjas	MacroAlg	AlgVerd	AlgFilam	AlgCrusCor	Turf	PMs	Arena	Cascajo
C1	1.79	0.08	1.23	0.19	0.73	0.64	0.00	1.48	0.50	76.04	10.19	0.22
C2	10.85	0.08	4.31	0.81	1.78	1.14	0.10	11.03	0.89	26.76	24.43	15.55
C3	8.29	0.01	3.37	0.71	11.30	1.97	2.27	0.10	26.43	12.59	26.71	7.65
C4	13.87	2.99	27.37	1.63	1.82	0.00	0.00	2.37	10.01	0.00	4.57	2.33
C5	1.86	0.00	0.51	0.08	2.02	0.00	0.00	1.42	2.88	0.00	90.13	0.17
C6	4.38	0.30	6.82	0.67	10.26	3.94	0.29	3.57	8.32	0.06	27.19	32.89
C7	17.91	0.79	4.22	0.81	0.56	0.20	0.00	22.48	5.03	0.00	42.25	4.42
C8	38.82	0.23	2.40	1.16	1.25	0.08	0.00	18.17	7.42	0.00	13.69	15.93
C9	4.23	0.00	1.54	0.15	77.64	0.00	0.24	0.00	2.79	0.00	12.93	0.62
C10	15.34	0.03	2.12	0.42	1.39	4.03	0.10	0.61	49.37	0.00	24.55	1.62
C11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla 3. Coberturas promedio por tipo de hábitat para el año 2022. C1, Camas densas de pastos marinos; C2, Parches coralinos en pastizales; C3degradada, Estructuras a barlovento dominadas por macroalgas; C4, Arrecife frontal dominado por octocorales y cobertura razonable de coral; C44 degradada, Arrecife frontal dominado por macroalgas con cobertura pobre de coral; C6, Planicies de cascajo y arena con algas y cobertura pobre de coral; C7, Estructuras coralinas con cobertura razonable de coral dominadas por cianobacterias y algas; C8, Estructuras dominadas por coral (cobertura buena); C9, No existe en T2; C10, Estructuras coralinas (cobertura razonable) dominadas por algas césped y sedimento; C11, Arenales y camas de cascajo con cobertura bentónica escasa. Los colores de las filas denotan la importancia ecológica de cada hábitat: verde es alta, amarillo es media y azul es baja.

	Abreviatura	CoralDuro	HidCor	Octocor	Esponjas	MacroAlg	AlgVerd	AlgFilam	AlgCrusCor	Turf	PMs	Arena	Cascajo
C1	PMD	0.68	0.00	0.00	0.10	0.06	1.70	7.19	0.00	0.40	53.85	18.58	3.12
C2	PCP	8.13	0.02	3.06	1.02	4.42	3.85	7.04	0.12	10.37	12.79	40.42	2.13
C33 deg	EBM	10.87	0.32	12.16	2.60	34.57	0.98	4.12	0.18	17.80	0.00	11.30	4.89
C4	AFO	10.72	4.23	41.11	3.08	13.85	0.10	3.27	0.38	19.38	0.00	1.20	0.14
C44 deg	AFM	5.82	0.75	17.86	3.22	35.99	0.10	4.21	0.12	5.72	0.00	18.92	7.14
C6	PAA	4.33	0.38	8.00	2.98	3.64	2.13	9.55	0.08	18.67	0.00	30.93	17.55
C7	ECC	11.44	0.05	2.31	0.45	1.56	2.84	23.87	0.04	19.04	0.00	13.30	2.38
C8	ECB	32.39	0.24	3.17	3.16	5.07	2.45	6.44	0.46	28.91	0.00	12.03	4.79
C9		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
C10	ECT	17.28	0.24	3.86	4.72	10.07	0.90	9.03	0.77	26.70	0.00	16.04	7.15
C11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

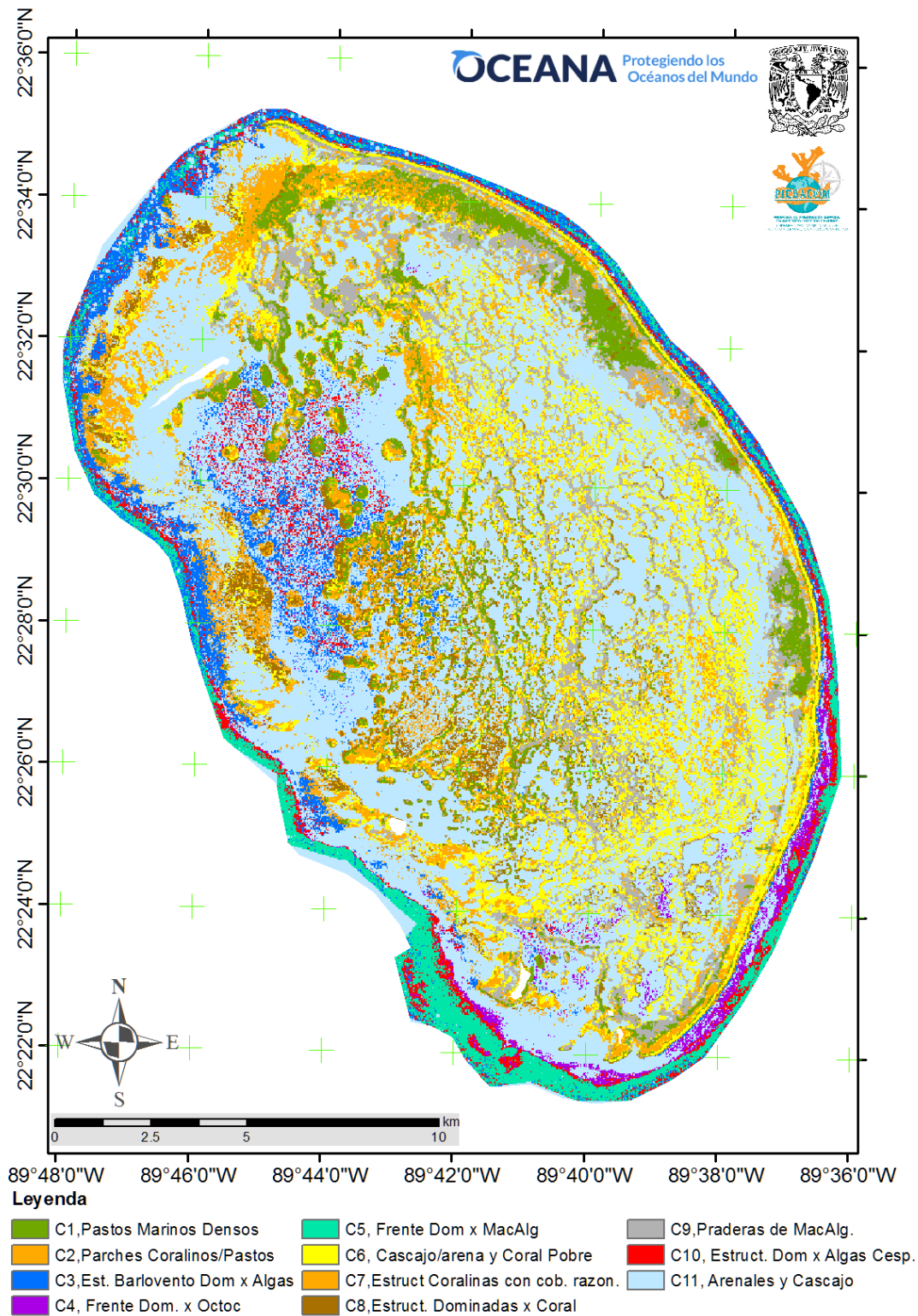


Figura 6. Mapa temático de tipos de fondo de la plataforma arrecifal para el año 2000. La nomenclatura de los tipos de hábitat sin abreviaturas se presenta en la **Tabla 2**.

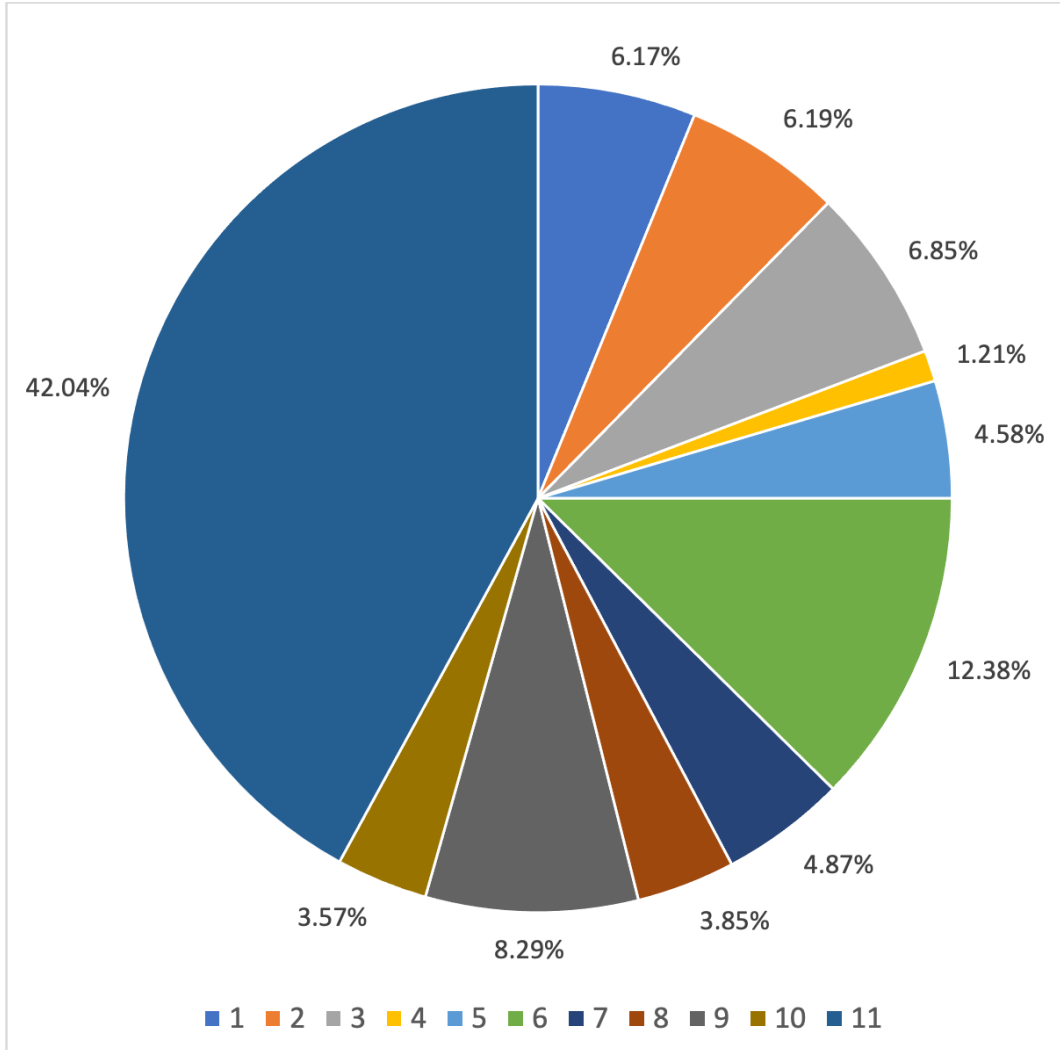


Figura 7. Porcentaje de cobertura por tipo de hábitat de la plataforma del Arrecife Alacranes para el año 2000, calculada con el mapa temático (Figura 6). C1, Camas densas de pastos marinos; C2, Parches coralinos en pastizales; C3 degradada, Estructuras a barlovento dominadas por macroalgas; C4, Arrecife frontal dominado por octocorales y cobertura razonable de coral; C44 degradada, Arrecife frontal dominado por macroalgas con cobertura pobre de coral; C6, Planicies de cascajo y arena con algas y cobertura pobre de coral; C7, Estructuras coralinas con cobertura razonable de coral dominadas por cianobacterias y algas; C8, Estructuras dominadas por coral (cobertura buena); C9, No existe en T2; C10, Estructuras coralinas (cobertura razonable) dominadas por algas césped y sedimento; C11, Arenales y camas de cascajo con cobertura bentónica escasa

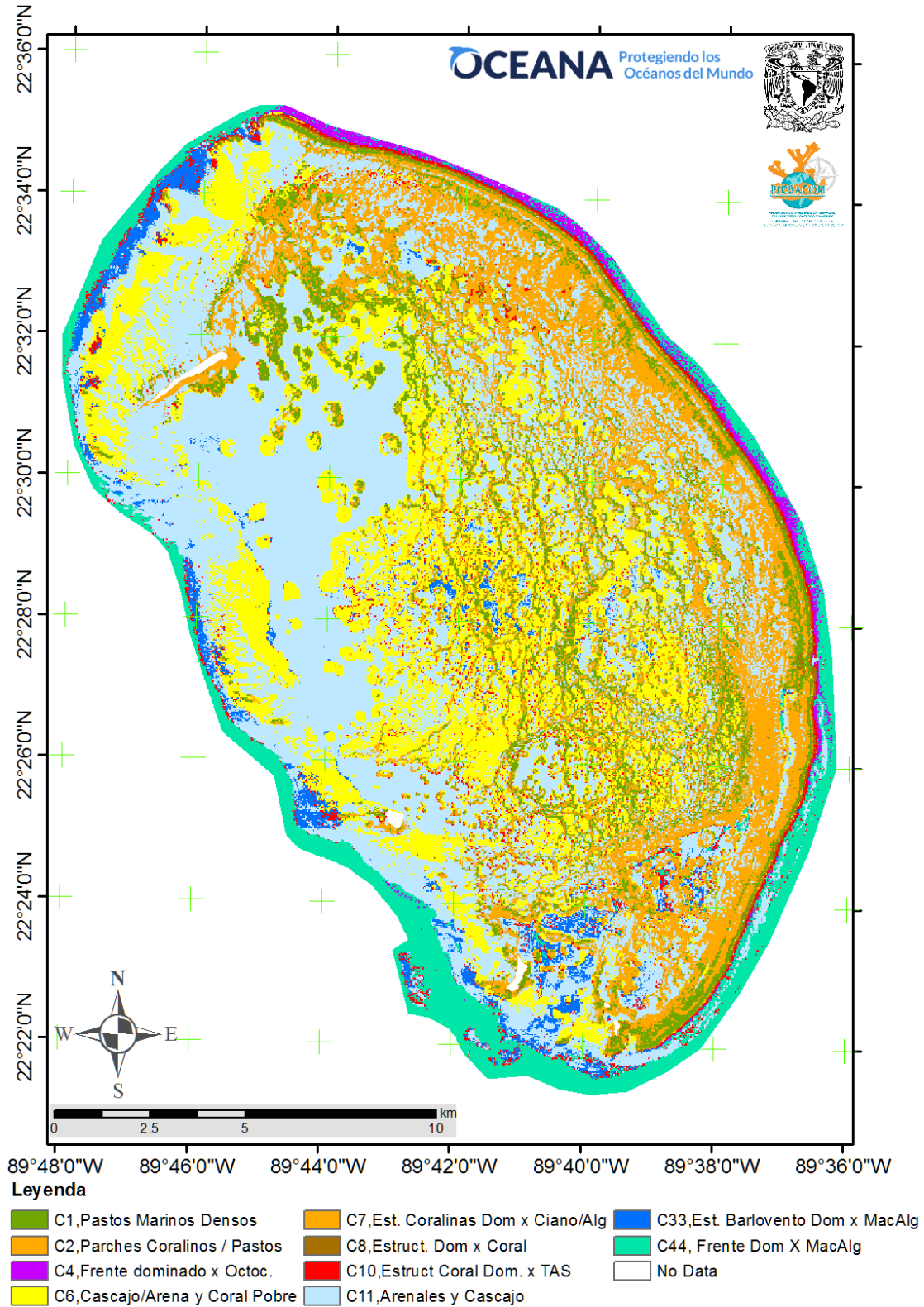


Figura 8. Mapa temático de tipos de fondo de la plataforma arrecifal para el año 2022 (T2). La nomenclatura de los tipos de hábitat sin abreviaturas se presenta en la **Tabla 3**.

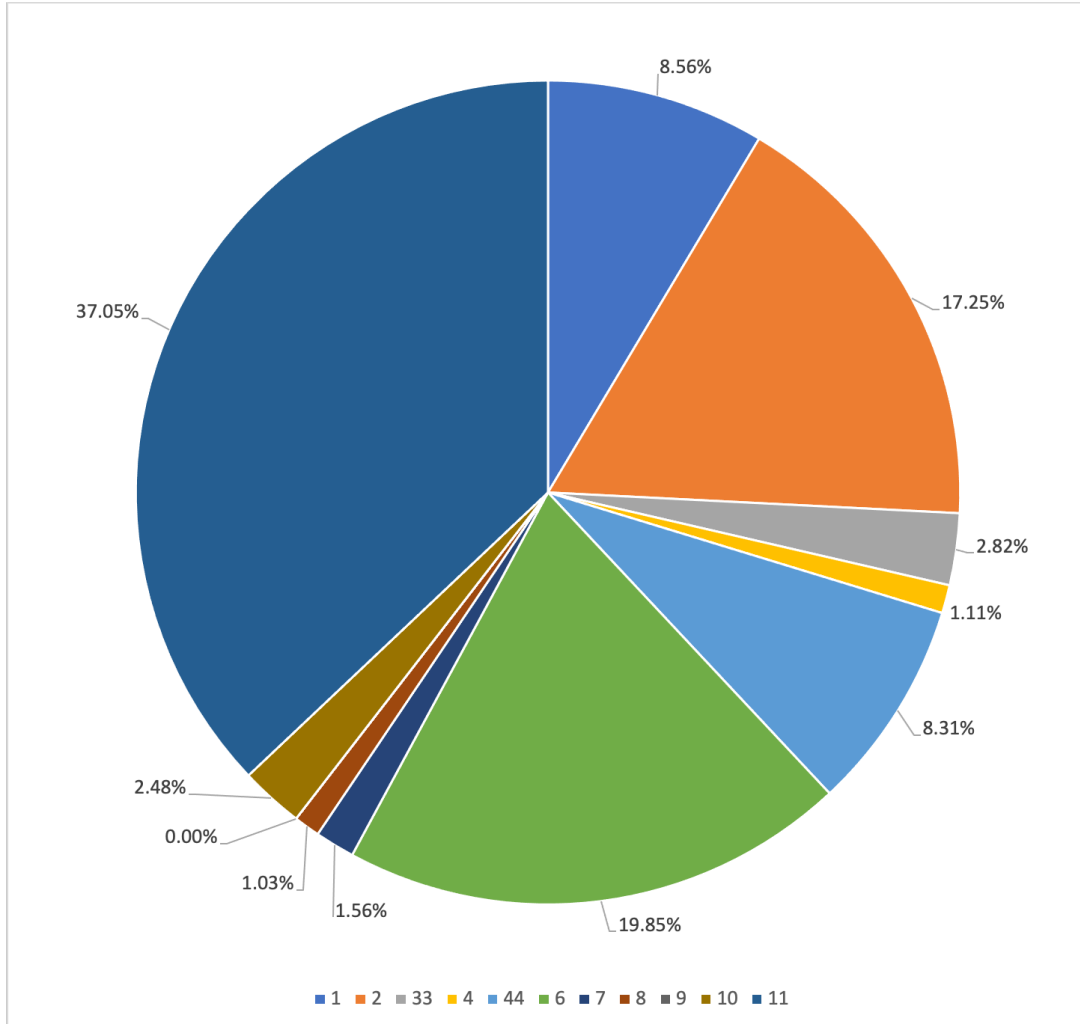


Figura 9. Porcentaje de cobertura por tipo de hábitat de la plataforma del Arrecife Alacranes para el año 2022, calculada con el mapa temático (Figura 8). C1, Camas densas de pastos marinos; C2, Parches coralinos en pastizales; C33 degradada, Estructuras a barlovento dominadas por macroalgas; C4, Arrecife frontal dominado por octocorales y cobertura razonable de coral; C44 degradada, Arrecife frontal dominado por macroalgas con cobertura pobre de coral; C6, Planicies de cascajo y arena con algas y cobertura pobre de coral; C7, Estructuras coralinas con cobertura razonable de coral dominadas por cianobacterias y algas; C8, Estructuras dominadas por coral (cobertura buena); C9, No existe en T2; C10, Estructuras coralinas (cobertura razonable) dominadas por algas césped y sedimento; C11, Arenales y camas de cascajo con cobertura bentónica escasa.

Componente bentónico

Cada uno de los nueve hábitats se describe por una combinación de componentes bentónicos que lo caracterizan (**Tabla 4**). El hábitat estructuras coralinas en buen estado (ECB) están mayormente dominados por corales duros, mientras que los hábitats arrecife frontal con macroalgas (AFM) y estructuras a barlovento con macroalgas (EBM) tienen dominancias de macroalgas carnosas (**Tabla 4**). También hay hábitats donde hay estructuras coralinas (**Tabla 4**), pero dominan ya sea las algas césped con sedimento (ECT), o las cianobacterias y algas (ECC), o los octocorales (AFO). Y finalmente están los hábitats con pocas estructuras coralinas (**Tabla 4**): dominados por pastos marinos densos (PMD), por arena y pastos (PCP), o por arena y escombros (PAA).

Tabla 4. Promedio del porcentaje de cobertura bentónica en función de los hábitats. LC es Coral vivo, CCA es alga coralina costrosa, TA es algas césped, TAS es algas césped y sedimento, CYAN es cianobacterias, PEY son algas peisonélidas, FMA son macroalgas carnosas, CMA son macroalgas calcáreas, AINV es invertebrados agresivos, OINV es otros invertebrados, RUB es pedacería, SAND es arena y SEAG es pasto marino. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

Hábitat	LC	CCA	TA	TAS	CYAN	PEY	FMA	CMA	AINV	OINV	RUB	SAND	SEAG
ECB	35	0	10	23	4	0	2	3	1	5	4	12	0
ECC	11	0	3	16	24	0	2	25	0	3	2	13	0
ECT	13	1	8	24	5	0	9	4	3	6	8	19	0
EBM	11	0	4	14	4	0	35	1	3	12	5	11	0
AFM	6	0	1	5	4	0	36	0	1	21	7	19	0
AFO	11	0	10	9	3	0	14	0	12	39	0	1	0
PCP	8	0	1	9	7	0	6	8	0	5	2	40	13
PMD	1	0	0	0	7	0	0	4	0	12	3	19	54
PAA	4	0	2	17	10	0	4	3	1	11	18	31	0

En reflejo de esto, el hábitat con mayor porcentaje de componentes bentónicas positivas es ECB, los hábitats con mayor porcentaje de componentes negativas son ECC, EBM, y ECT, y los hábitats con mayor porcentaje de componentes neutras son PCP, PMD y PAA (**Tabla 5**). AFO y AFM están caracterizados por una co-dominancia de componentes neutros y negativos (**Tabla 5**).

Tabla 5. Promedio de los porcentajes de componentes bentónicas positivas, neutras y negativas en función de los hábitats. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

Hábitat	Componentes Bentónicas Positivas	Componentes Bentónicas Neutras	Componentes Bentónicas Negativas
ECB	35	21	43
ECC	11	18	70
ECT	14	32	54
EBM	11	29	60
AFM	6	47	47
AFO	11	40	49
PCP	8	60	32
PMD	1	87	12
PAA	4	59	36

En relación con los componentes bentónicos, las pruebas estadísticas revelan diferencias significativas únicamente entre la zona núcleo norte y la zona de amortiguamiento, tanto para los componentes bentónicos neutros, como para los negativos (**Figura 10**). Efectivamente, en la zona núcleo norte se encontraron de forma significativa sitios con mayor dominancia de componentes neutros y menor dominancia de componentes negativos que en la zona de amortiguamiento (**Figura 10**).

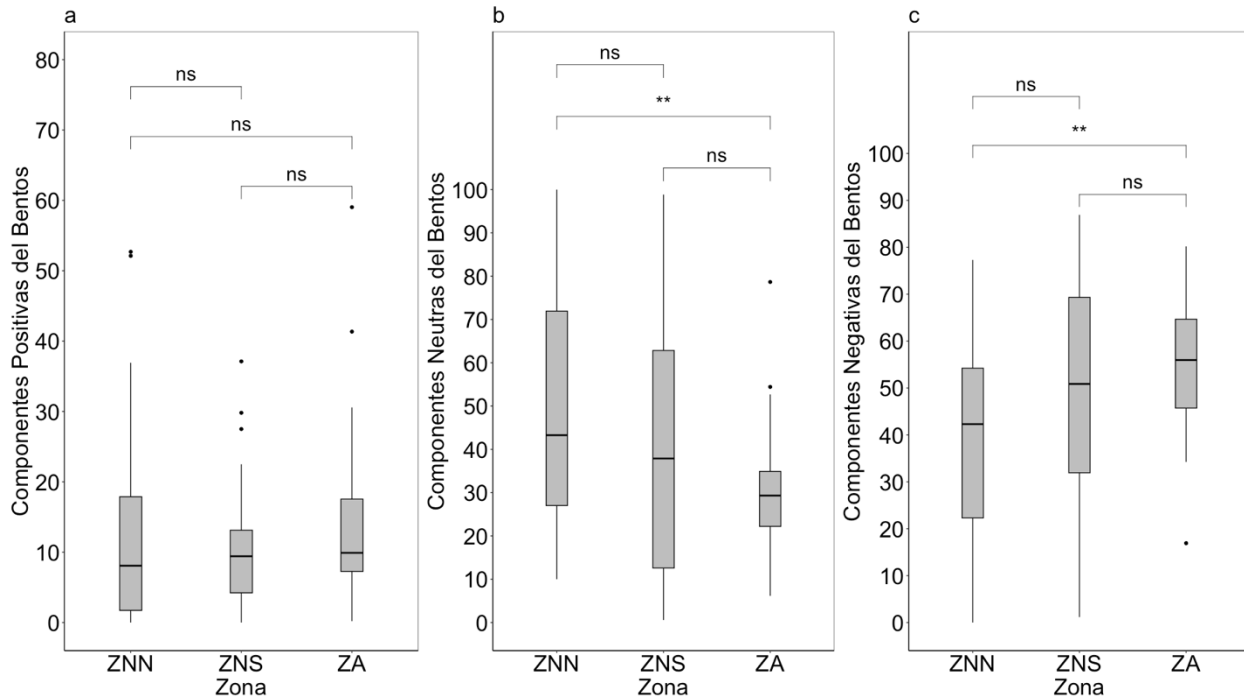


Figura 10. Comparación de las componentes positivas, neutras y negativas del bentos en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

Componente íctico

Las mayores biomásas están relacionadas con el hábitat con dominancia de estructuras coralinas en buena condición (**Tabla 6**). Los peces que contribuyen mayormente a la biomasa total son los herbívoros, los carnívoros y los depredadores, mientras que los invertívoros y omnívoros contribuyen poco debido a sus pequeñas tallas (**Figura 11**). Los hábitats donde la biomasa total es mayormente representada por los peces herbívoros son: ECT y PCP, mientras que los hábitats donde la biomasa total es mayormente representada por los depredadores tope son EBM y PAA (**Figura 11**).

Tabla 6. Promedio de las biomases de distintos grupos tróficos de peces en función de los hábitats. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. H corresponde a Herbívoros, I a Invertívoros, O a Omnívoros, C a Carnívoros y D a Depredadores.

Hábitat	H	I	O	C	D	BT
ECB	9074	50	2152	7632	3215	22123
ECC	3589	10	1088	1307	1374	7368
ECT	7624	117	1865	1718	2844	14168
EBM	3675	21	1400	1144	7176	13417
AFM	3045	497	818	1048	3294	8701
AFO	4286	0	672	896	3792	9647
PCP	3628	0	1205	1193	482	6507
PMD	109	0	127	1046	1132	2414
PAA	3206	24	351	2226	9025	14832

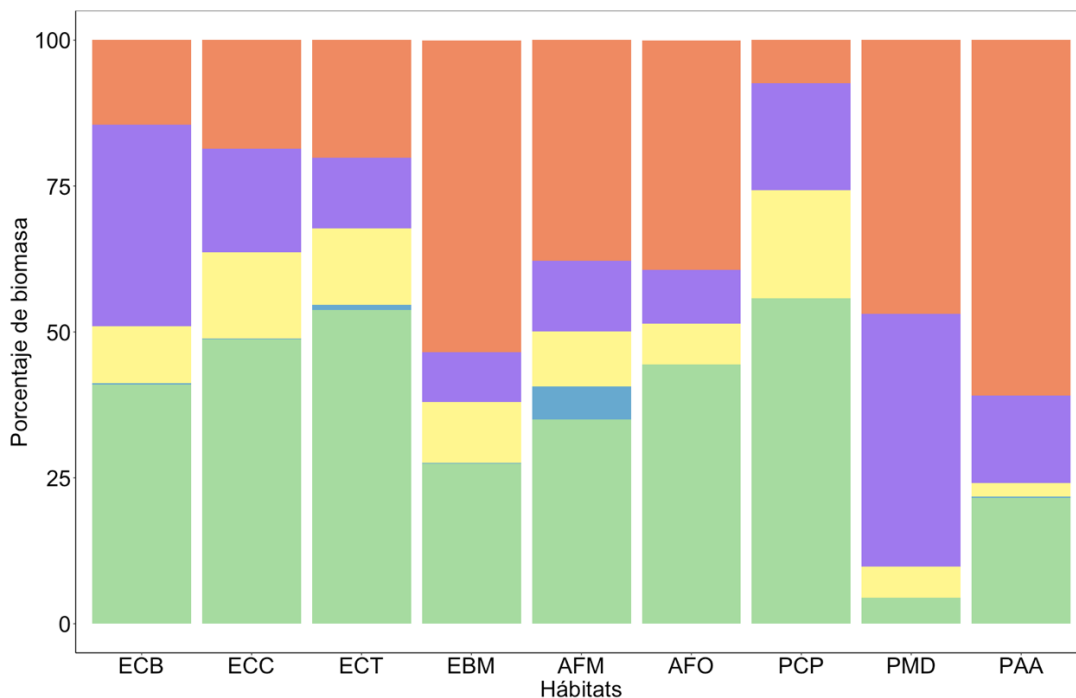


Figura 11. Porcentaje de biomasa de los diferentes grupos tróficos en función de cada hábitat. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. Los colores corresponden al nivel trófico de las especies: verde son especies herbívoras, azul especies invertívoras, amarillo especies omnívoras y morado especies carnívoras.

En relación con las biomásas de diferentes grupos tróficos, las pruebas estadísticas revelan algunas diferencias significativas (**Figura 12**). En el caso de los herbívoros, los resultados muestran diferencias significativas entre las zonas núcleo (norte y sur) y la zona de amortiguamiento, en la cual hay sitios con biomásas significativamente más altas que en las zonas núcleo (**Figura 12**).

También se hallaron diferencias significativas entre la zona núcleo sur y la zona de amortiguamiento: mayores biomásas de invertívoros y menor biomasa total en la primera (**Figura 12**). Además, se encontraron diferencias significativas entre la zona núcleo norte y sur: mayores biomásas de depredadores y biomasa total en la primera (**Figura 12**).

En resumen, la zona de amortiguamiento cuenta con sitios con biomásas de herbívoros significativamente más altas que en las dos zonas núcleo, y dentro de las zonas núcleos la zona núcleo norte tiene sitios con biomásas de depredadores y totales significativamente mayores.

Análisis integral

De manera integral, se observan principalmente diferencias bentónicas entre hábitats con pocas estructuras coralinas y hábitats con estructuras coralinas (**Figura 13**). En general, las biomásas de peces están asociadas a hábitats con mayores estructuras (**Figura 13**). Además, por un lado, herbívoros, omnívoros y carnívoros están correlacionados positivamente, y, por otro lado, invertívoros y depredadores están correlacionados positivamente (**Figura 13**).

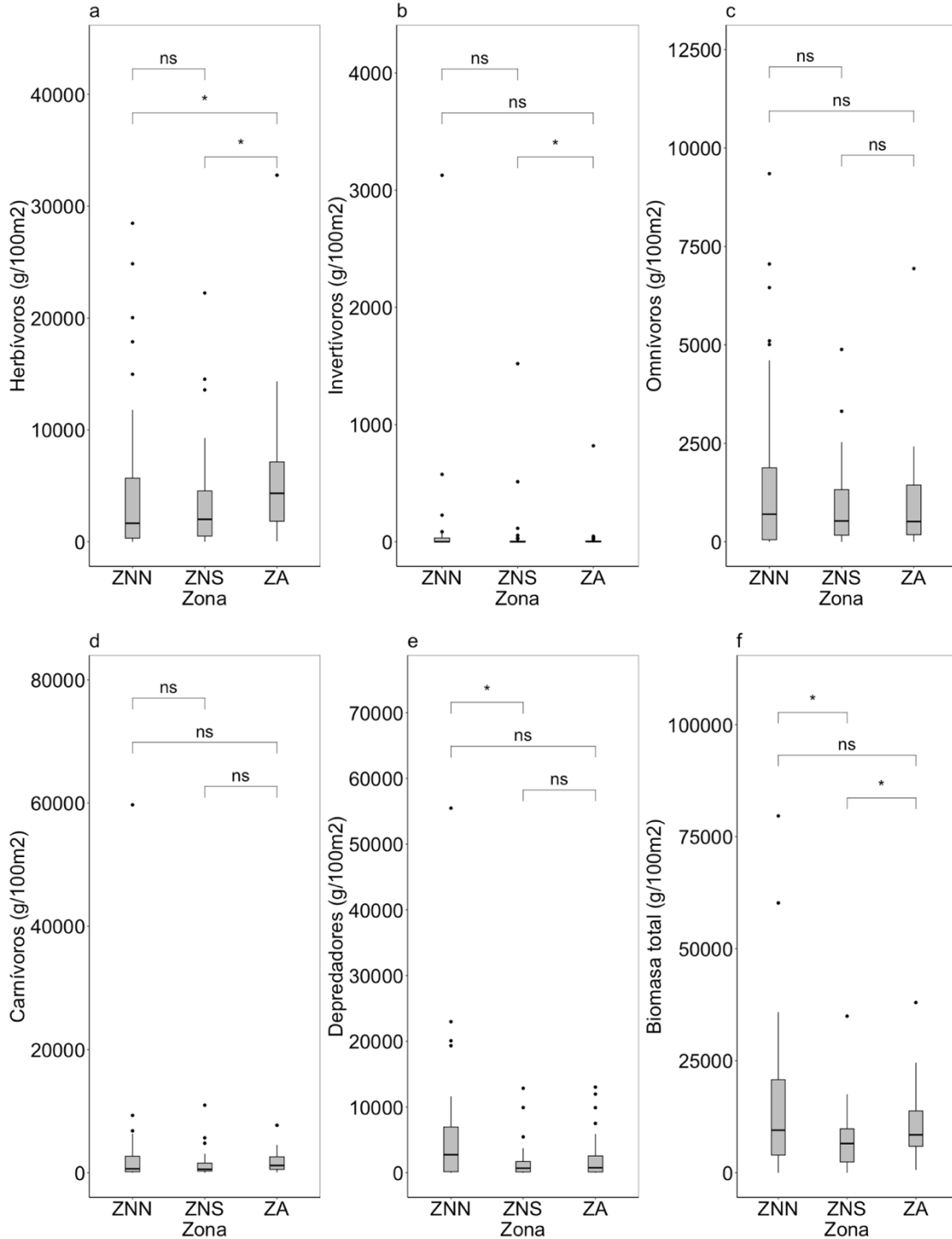


Figura 12. Comparación de las biomásas de diferentes grupos tróficos de peces en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

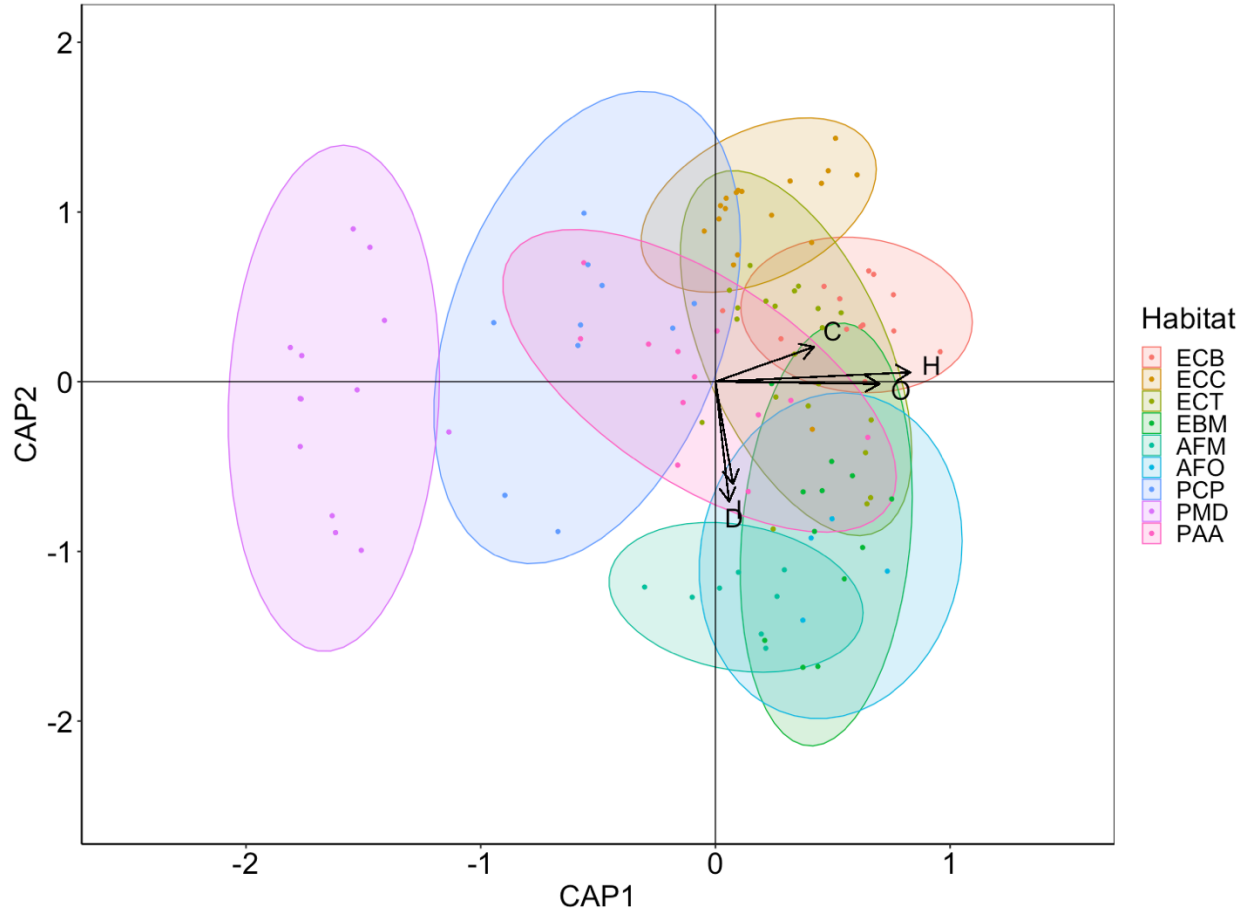


Figura 13. Análisis canónico de coordenadas principales de la cobertura bentónica en función de los hábitats marinos descritos en este estudio. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. Las biomazas de los distintos grupos tróficos se proyectaron en el espacio multidimensional. H corresponde a Herbívoros, I a Invertívoros, O a Omnívoros, C a Carnívoros y D a Depredadores.

7.2. Diversidad

Corales

Se registraron en total 30 especies de corales duros pertenecientes a 9 familias (**Tabla 7**), de las cuales únicamente 9 especies representan el 90% de la abundancia (**Figura**

14): *Orbicella annularis* (OANN), *Pseudodiploria strigosa* (PSTR), *Porites astreoides* (PAST), *Montastraea cavernosa* (MCAV), *Siderastrea siderea* (SSID), *Orbicella franksi* (OFRA), *Porites porites* (PPOR), *Acropora cervicornis* (ACER) y *Acropora prolifera* (APRO).

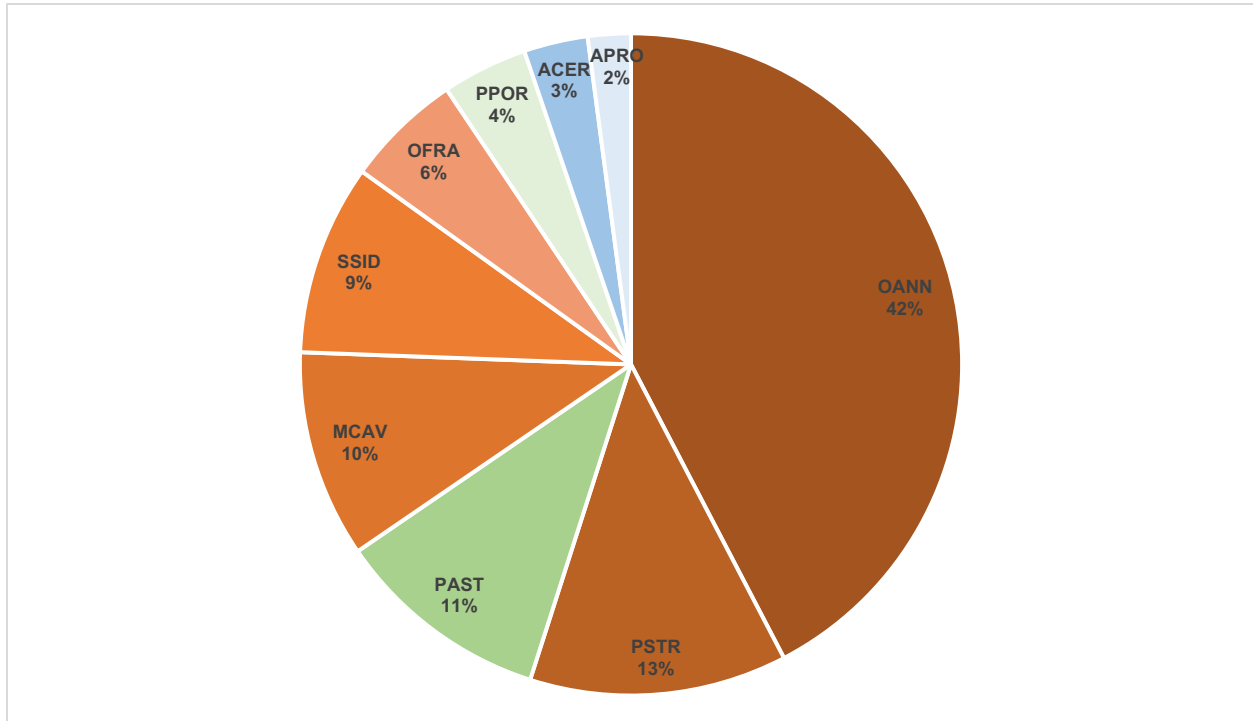


Figura 14. Especies coralinas que representan el 90% de la abundancia. Las tonalidades de rojo y naranja están asociadas a especies de estrategia de vida estrés-tolerante, el color verde a la estrategia de vida ruderal y el azul a la estrategia competitiva.

Con base en los rasgos de las especies de coral asociados al funcionamiento de los arrecifes coralinos (talla máxima, tasa de calcificación, rugosidad, forma, modo de reproducción, talla del coralito y rango de profundidad), se clasificaron las 30 especies de corales duros en tres estrategias de vida: competitiva, estrés-tolerante y ruderal (**Tabla 7 y Figura 15**).

Tabla 7. Listado de especies de corales duros avistadas en los 111 sitios monitoreados.

	Estrategia de vida	Nombre científico	Familia
1		<i>Acropora cervicornis</i>	
2	Competitiva	<i>Acropora palmata</i>	Acroporidae
3		<i>Acropora prolifera</i>	
4		<i>Colpophyllia natans</i>	
5	Estrés-tolerante	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	Mussidae
6		<i>Pseudodiploria clivosa</i>	
7		<i>Pseudodiploria strigosa</i>	
8		<i>Dichocoenia stokesi</i>	
9		<i>Eusmilia fastigiata</i>	Meandrinidae
10		<i>Meandrina meandrites</i>	
11		<i>Montastraea cavernosa</i>	
12		<i>Orbicella annularis</i>	Montastraeidae
13		<i>Orbicella faveolata</i>	
14		<i>Orbicella franksi</i>	
15		<i>Stephanocoenia intersepta</i>	
16		<i>Siderastrea siderea</i>	Siderastreidae
17		<i>Agaricia agaricites</i>	Agariciidae
18		<i>Agaricia fragilis</i>	
19	<i>Agaricia lamarcki</i>		
20	<i>Agaricia tenuifolia</i>		
21	<i>Helioseris cucullata</i>		
22	Ruderal	<i>Madracis decactis</i>	Pocilloporidae
23		<i>Favia fragum</i>	Mussidae
24		<i>Manicina areolata</i>	
25		<i>Mycetophyllia ferox</i>	
26		<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	
27		<i>Porites astreoides</i>	Poritidae
28		<i>Porites furcata</i>	
29	<i>Porites porites</i>		
30		<i>Siderastrea radians</i>	Siderastreidae

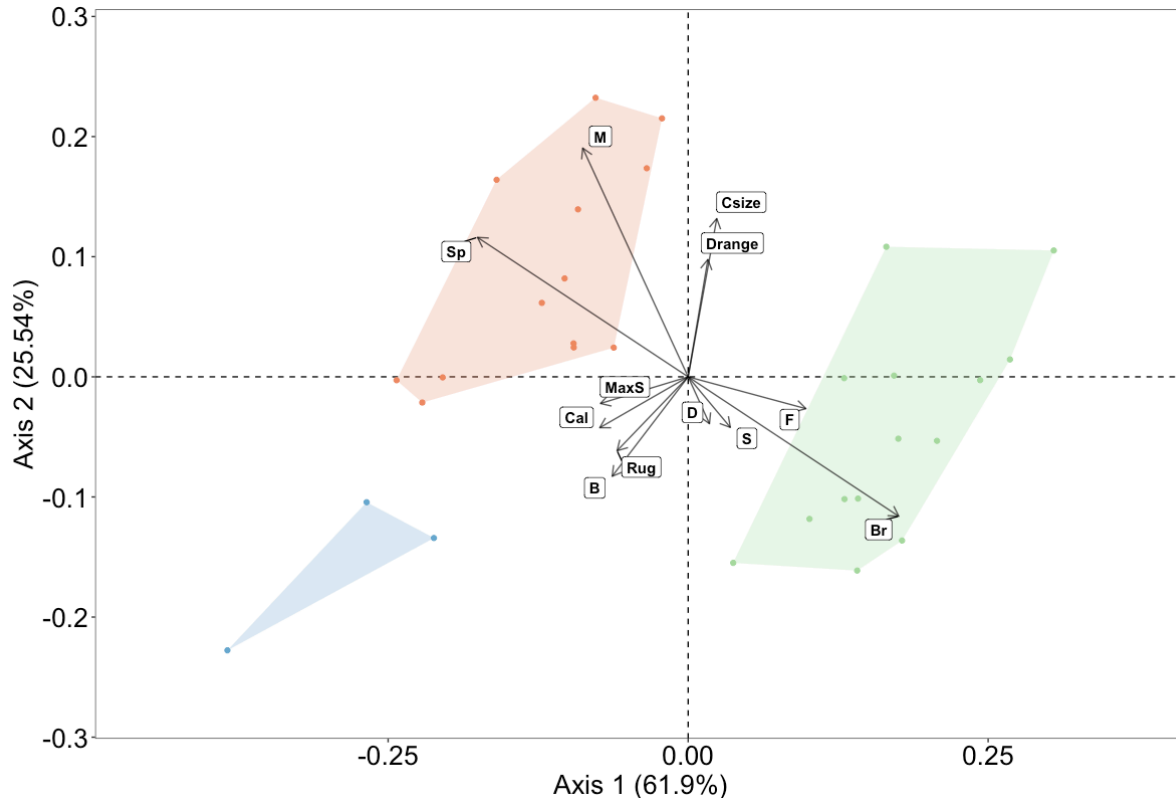


Figura 15. Clasificación de las especies de corales avistadas en tres estrategias de vida: competitiva (puntos azules), estrés-tolerante (puntos naranjas) y ruderal (puntos verdes). Los primeros dos ejes del análisis representan el 89.74% de la variabilidad. Para el rasgo reproducción, Br son corales incubadores y Sp son corales desovadores. Para el rasgo de forma de la colonia, B es ramificada, M es coral masiva, S es submasiva, D es digitiforme y F es foliosa. Para los rasgos cuantitativos que describen a las especies coralinas, MaxS es talla máxima, Csize es la talla del coralito, Cal es la tasa de calcificación, Rug es la rugosidad, y Drange es el rango de profundidad.

La estrategia de vida más abundante considerando todos los sitios evaluados en el PNAA es la estrategia estrés-tolerante, representada mayormente por los géneros *Orbicella*, *Pseudodiploria*, *Montastraea* y *Siderastrea*, seguida por la estrategia de vida ruderal representada principalmente por los géneros *Agaricia* y *Porites* (**Figura 16**). Por otro lado, la estrategia menos abundante fue la estrategia competitiva representada únicamente por el género *Acropora* (**Figura 16**).

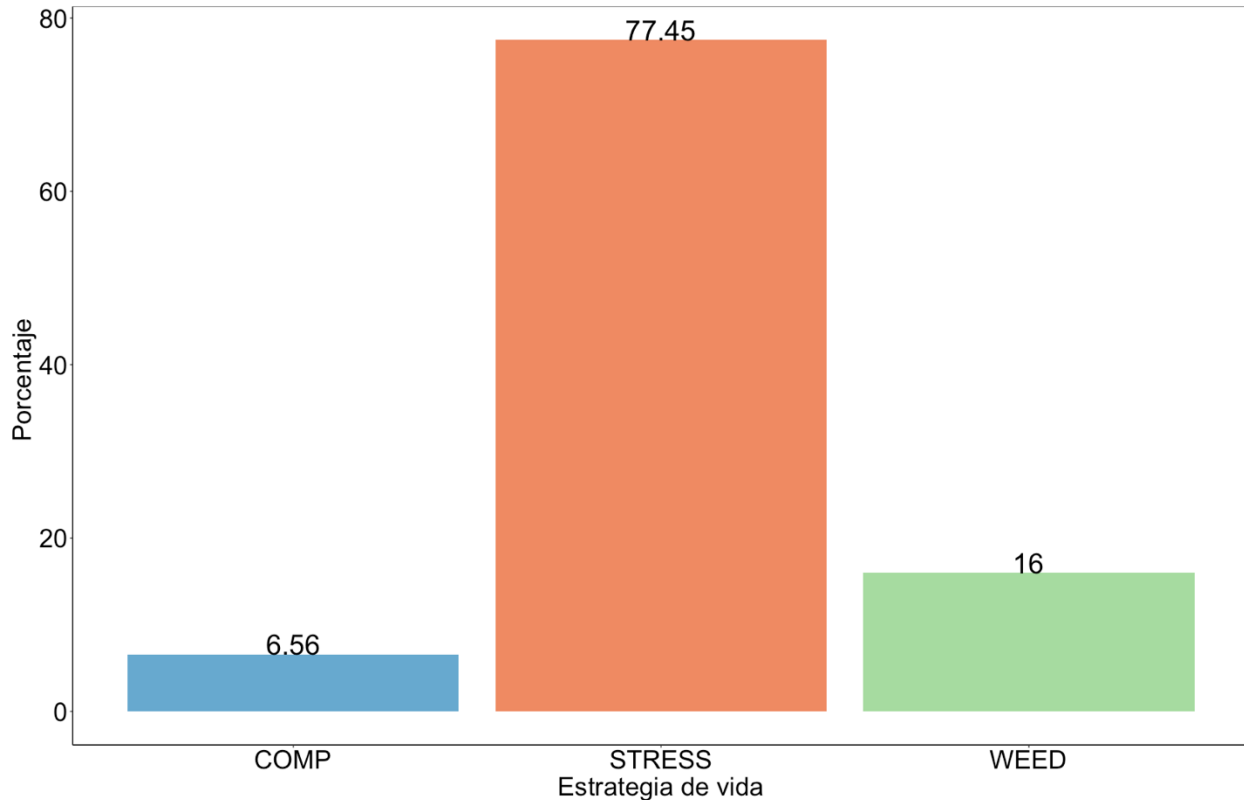


Figura 16. Proporción de estrategias de vida de las colonias registradas en los siete sitios evaluados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. COMP es estrategia competitiva, STRESS es estrategia estrés-tolerante, WEED es estrategia ruderal.

Los índices de diversidad específica de Hill para los corales indican diferencias significativas entre la zona núcleo del sur y la zona de amortiguamiento (**Figura 17**), para todos los números de Hill (N0, N1 y N2). También se presentan las distribuciones espaciales de la riqueza de especies de coral (N0) y de diversidad de Hill (N1 y N2) en los 111 sitios muestreados en 2022 en la plataforma arrecifal del PNAA y los patrones espaciales no son evidentes, sin embargo, se observa menor diversidad de peces en el arrecife frontal del sur este (**Figura 18** y **Figura 19**).

Los hábitats con mayor riqueza (N0) y balance de abundancia (N1 y N2) de especies de corales (**Tabla 8**) son los hábitats con estructuras (ECB, ECT, EBM). El hábitat sin estructuras coralinas (PMD) tienen tanto menor riqueza (N0), como balance de abundancia (N1 y N2) de especies de corales (**Tabla 8**).

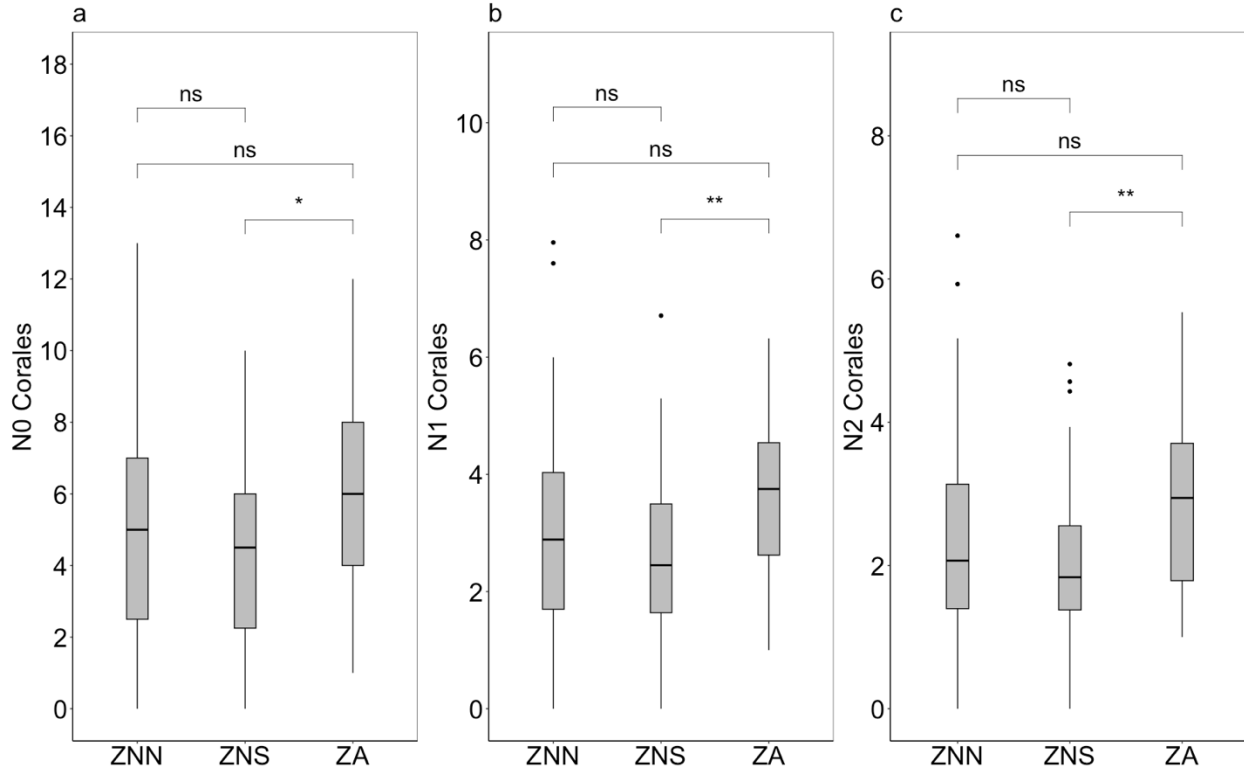


Figura 17. Comparación de los números de diversidad de Hill (N0, N1 y N2) para las especies de corales en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

Tabla 8. Promedio y desviación estándar de los números de diversidad de Hill de las especies de coral (N0C, N1C y N2C) en función de los nueve hábitats marinos descritos en este estudio. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

	Hábitat	\bar{X}_{N0C}	SD_{N0C}	\bar{X}_{N1C}	SD_{N1C}	\bar{X}_{N2C}	SD_{N2C}
1	ECB	6	3	3	1	2	1
2	ECC	5	2	3	1	2	1
3	ECT	7	3	4	2	3	1
4	EBM	7	2	4	2	3	1
5	AFM	5	1	4	1	3	1
6	AFO	7	1	3	1	3	0
7	PCP	3	2	2	1	2	1
8	PMD	0	1	0	1	0	1
9	PAA	4	2	3	2	3	1

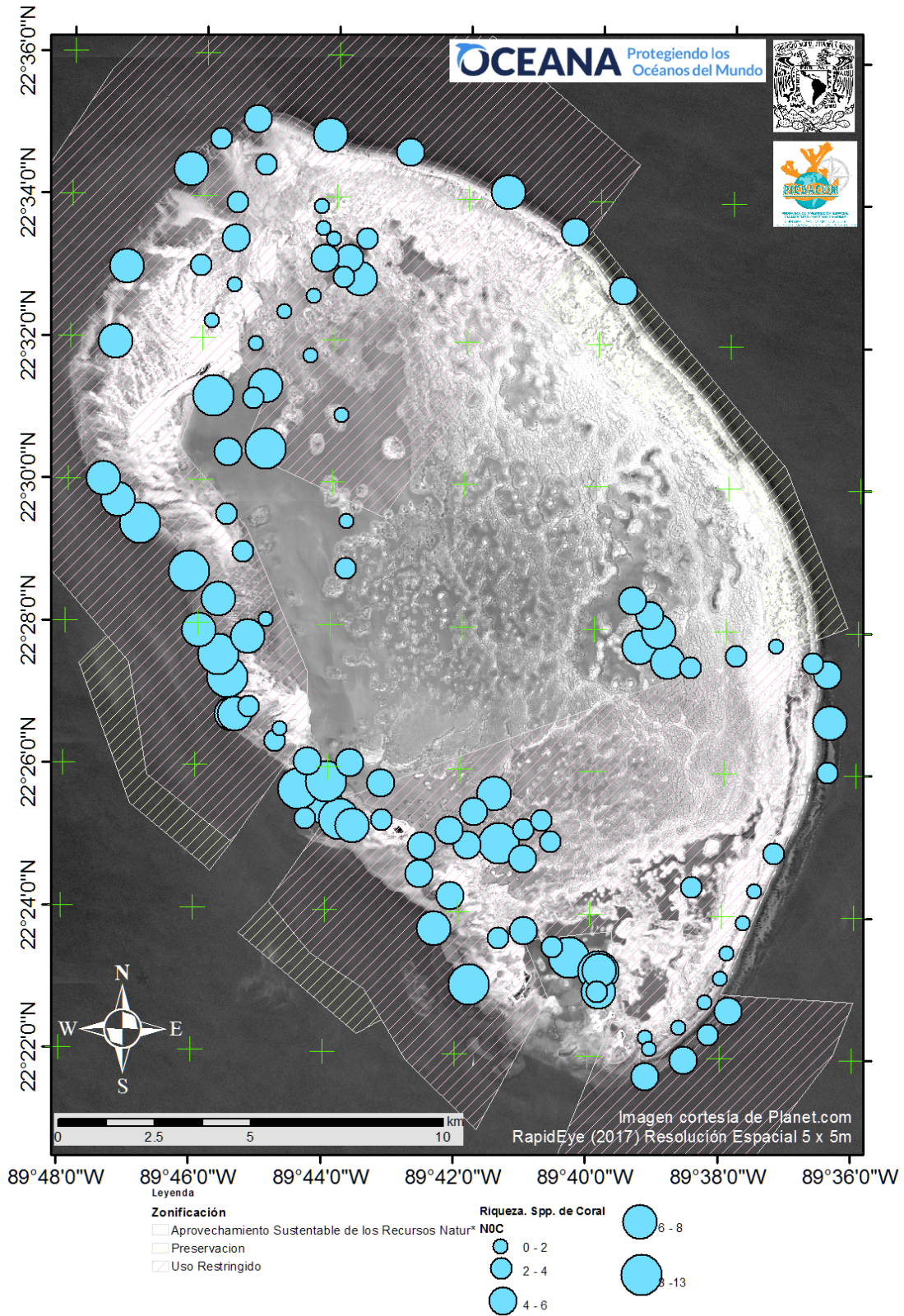


Figura 18. Riqueza específica de (N0) de corales, registrada en los sitios muestreados en mayo, julio y agosto de 2022.

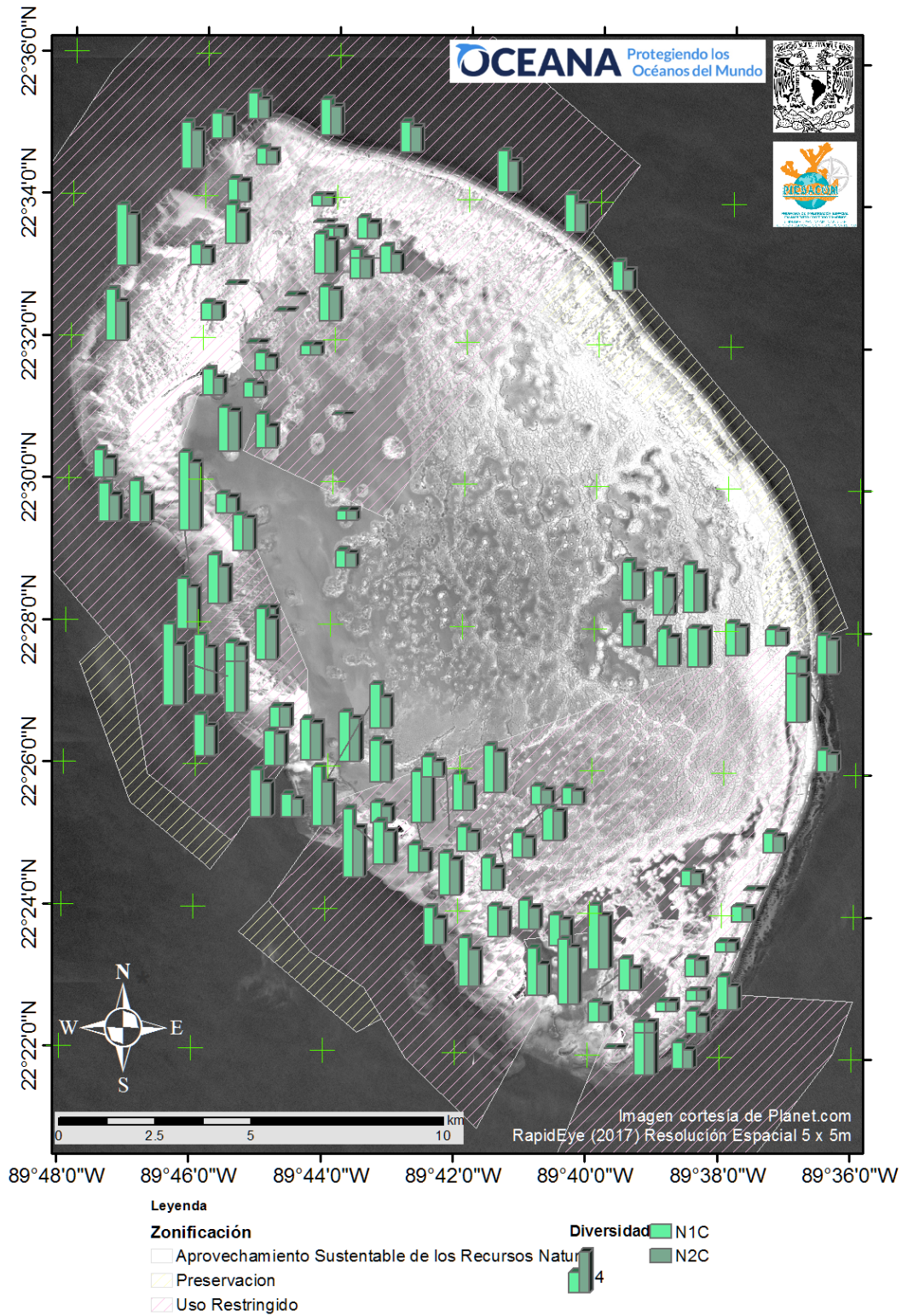


Figura 19. Diversidad de Hill (N1 y N2) de corales, registrada en los sitios muestreados en mayo, julio y agosto de 2022.

El análisis integral muestra que los hábitats con estructuras coralinas (principalmente ECB, ECT y EBM) son más diversos en la composición específica de los corales y están caracterizados por valores de índices de diversidad más altos (**Figura 20**). Contrariamente, los hábitats sin estructuras coralinas (PMD y PAA) son menos diversos en la composición específica de los corales y están caracterizados por valores de índices de diversidad bajos (**Figura 20**).

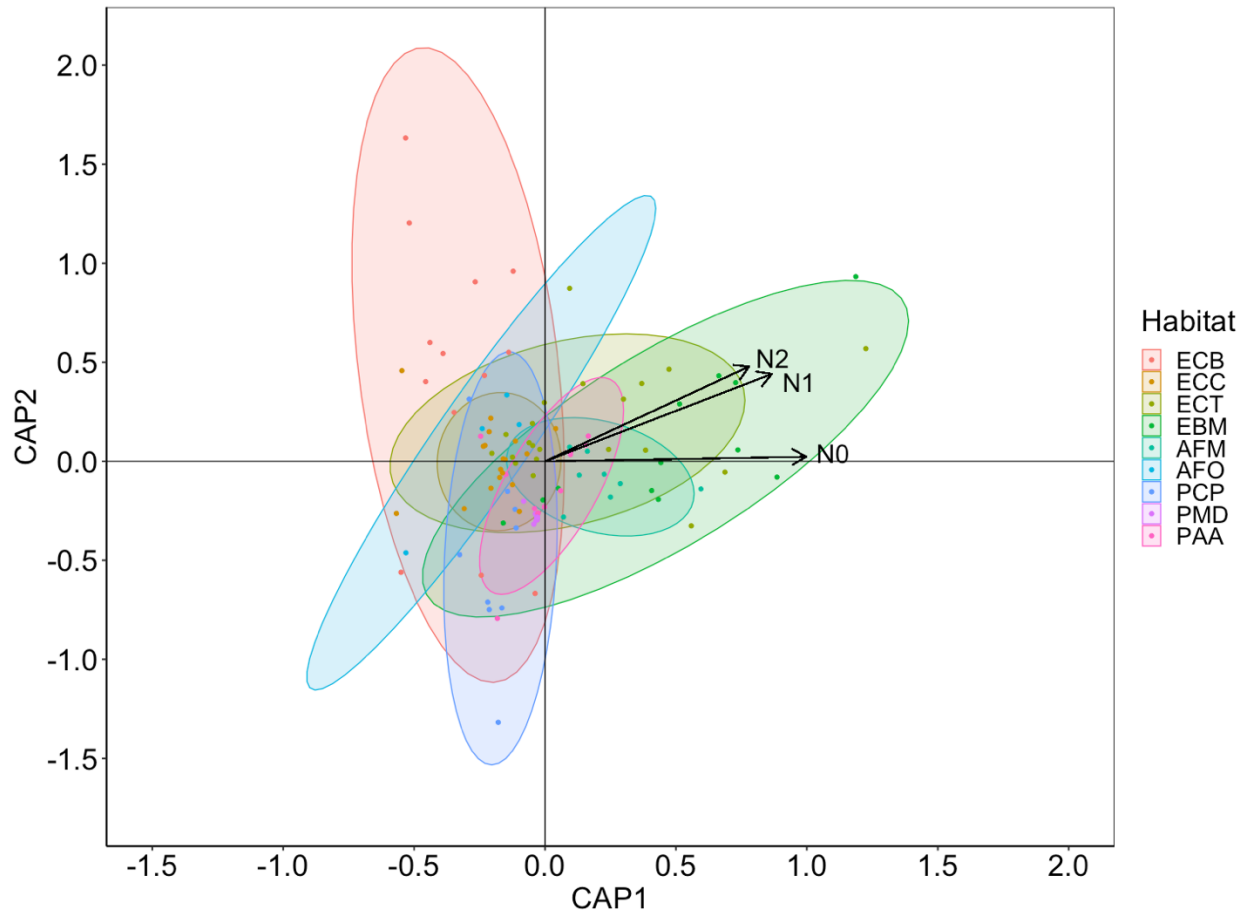


Figura 20. Análisis canónico de coordenadas principales de la abundancia de especies de coral en función de los hábitats marinos descritos en este estudio. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. Los números de diversidad de Hill (N0, N1 y N2) se proyectaron en el espacio multidimensional.

Peces

En el caso de los peces, se censaron 116 especies pertenecientes a 32 familias (**Tabla 9**), de las cuales 19 especies representan el 90% de la abundancia, las cuales son mayoritariamente omnívoros (**Figura 21 y Figura 22**). Los omnívoros son los peces más abundantes en el PNAA, mayormente representados por peces pequeños de la familia Atherinidae, así como por Lábridos y Pomacéntridos (**Figura 21 y Figura 22**). Los herbívoros siguen en abundancia, representados por los peces Cirujanos y Loros, seguidos por los invertívoros, los cuales en gran parte son Góbidos de talla muy pequeña (**Figura 21 y Figura 22**). Entre los peces carnívoros y depredadores más abundantes, encontramos peces Haemúlidos y Lutjánidos (**Figura 21 y Figura 22**).

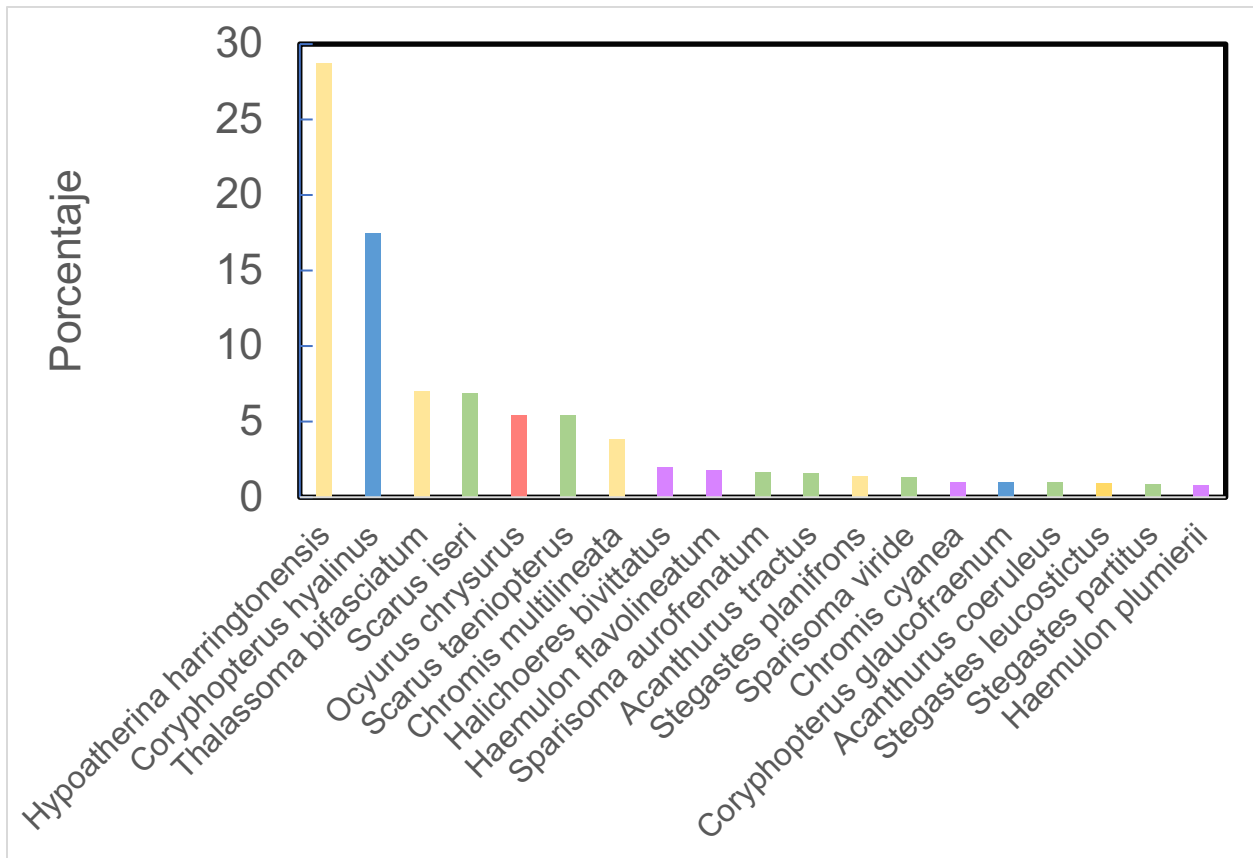


Figura 21. Especies de peces dominantes en los sitios evaluados, representando el 90% de la abundancia de individuos. Los colores corresponden al nivel trófico de las especies: verde son especies herbívoras, azul especies invertívoras, amarillo especies omnívoras y morado especies carnívoras.

Tabla 9. Listado de familias y especies de peces en los 111 sitios monitoreados.

	Clase	Familia	Nombre científico	
1	Chondrichtios	Dasyatidae	<i>Dasyatis americana</i>	
2		Myliobatidae	<i>Aetobatus narinari</i>	
3			<i>Acanthurus chirurgus</i>	
4		Acanthuridae	<i>Acanthurus coeruleus</i>	
5			<i>Acanthurus tractus</i>	
6		Atherinidae	<i>Hypoatherina harringtonensis</i>	
7		Aulostomidae	<i>Aulostomus maculatus</i>	
8			<i>Balistes vetula</i>	
9		Balistidae	<i>Canthidermis sufflamen</i>	
10			<i>Melichthys niger</i>	
11			<i>Caranx hippos</i>	
12		Carangidae	<i>Caranx latus</i>	
13			<i>Caranx ruber</i>	
14		Chaenopsidae	<i>Hemiemblemaria simulus</i>	
15			<i>Lucayablennius zingaro</i>	
16			<i>Chaetodon capistratus</i>	
17		Chaetodontidae	<i>Chaetodon ocellatus</i>	
18			<i>Chaetodon striatus</i>	
19	Osteictios		<i>Chilomycterus antennatus</i>	
20		Diodontidae	<i>Diodon holocanthus</i>	
21			<i>Diodon hystrix</i>	
22			<i>Coryphopterus eidolon</i>	
23			<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	
24		Gobiidae	<i>Coryphopterus hyalinus</i>	
25			<i>Elacatinus oceanops</i>	
26			<i>Gnatholepis thompsoni</i>	
27		Grammatidae	<i>Grama loreto</i>	
28			<i>Anisotremus virginicus</i>	
29			<i>Haemulon aurolineatum</i>	
30			<i>Haemulon carbonarium</i>	
31		Haemulidae		<i>Haemulon chrysargyreum</i>
32				<i>Haemulon flavolineatum</i>
33				<i>Haemulon melanurum</i>
34				<i>Haemulon plumierii</i>
35				<i>Haemulon sciurus</i>
36			Holocentridae	<i>Holocentrus adscensionis</i>

Tabla 9. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	
37	Kyphosidae	<i>Kyphosus spp.</i>	
38		<i>Bodianus rufus</i>	
39		<i>Clepticus parrae</i>	
40		<i>Halichoeres bivittatus</i>	
41		<i>Halichoeres caudalis</i>	
42		<i>Halichoeres garnoti</i>	
43		<i>Halichoeres maculipinna</i>	
44		<i>Halichoeres pictus</i>	
45		<i>Halichoeres radiatus</i>	
46		<i>Lachnolaimus maximus</i>	
47		<i>Thalassoma bifasciatum</i>	
48		Labrisomidae	<i>Malacoctenus macropus</i>
49			<i>Malacoctenus triangulatus</i>
50		Lutjanidae	<i>Lutjanus analis</i>
51			<i>Lutjanus apodus</i>
52			<i>Lutjanus buccanella</i>
53			<i>Lutjanus griseus</i>
54	<i>Lutjanus jocu</i>		
55	<i>Ocyurus chrysurus</i>		
56	<i>Rhomboplites aurorubens</i>		
57	<i>Malacanthidae</i>		<i>Malacanthus plumieri</i>
58	Monacanthidae	<i>Aluterus scriptus</i>	
59		<i>Cantherhines macrocerus</i>	
60		<i>Cantherhines pullus</i>	
61		<i>Monacanthus tuckeri</i>	
62	Mullidae	<i>Mulloidichthys martinicus</i>	
63		<i>Pseudupeneus maculatus</i>	
64	Opistognatidae	<i>Opistognathus aurifrons</i>	
65	Ostraciidae	<i>Acanthostracion polygonia</i>	
66		<i>Lactophrys triqueter</i>	
67	Pomacanthidae	<i>Centropyge argi</i>	
68		<i>Holacanthus bermudensis</i>	
69		<i>Holacanthus ciliaris</i>	
70		<i>Pomacanthus arcuatus</i>	
71		<i>Pomacanthus paru</i>	
72		<i>Abudefduf saxatilis</i>	
73		<i>Chromis cyanea</i>	
74	<i>Chromis multilineata</i>		
75	Pomacentridae	<i>Chromis scotti</i>	
76		<i>Microspathodon chrysurus</i>	
77		<i>Neopomacentrus cyanomos</i>	
78		<i>Stegastes adustus</i>	
79		<i>Stegastes diencaeus</i>	

Tabla 9. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	
80		<i>Stegastes leucostictus</i>	
81	Pomacentridae	<i>Stegastes partitus</i>	
82		<i>Stegastes planifrons</i>	
83		<i>Scarus coelestinus</i>	
84		<i>Scarus coeruleus</i>	
85		<i>Scarus guacamaia</i>	
86		<i>Scarus iseri</i>	
87		<i>Scarus taeniopterus</i>	
88	Scaridae	<i>Scarus vetula</i>	
89		<i>Sparisoma atomarium</i>	
90		<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	
91		<i>Sparisoma chrysopteron</i>	
92		<i>Sparisoma rubripinne</i>	
93		<i>Sparisoma viride</i>	
94	Sciaenidae	<i>Equetus punctatus</i>	
95	Scorpaenidae	<i>Pterois spp.</i>	
96		<i>Cephalopholis cruentata</i>	
97	Osteictios	<i>Cephalopholis fulva</i>	
98		<i>Epinephelus adscensionis</i>	
99		<i>Epinephelus guttatus</i>	
100		<i>Epinephelus morio</i>	
101		<i>Epinephelus striatus</i>	
102		<i>Hypoplectrus chlorurus</i>	
103		Serranidae	<i>Hypoplectrus indigo</i>
104			<i>Hypoplectrus puella</i>
105			<i>Mycteroperca bonaci</i>
106			<i>Mycteroperca interstitialis</i>
107	<i>Mycteroperca tigris</i>		
108	<i>Mycteroperca venenosa</i>		
109	<i>Serranus tabacarius</i>		
110		<i>Serranus tigrinus</i>	
111		<i>Calamus bajonado</i>	
112	Sparidae	<i>Calamus calamus</i>	
113		<i>Calamus pennatula</i>	
114	Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i>	
115		<i>Canthigaster rostrata</i>	
116	Tetraodontidae	<i>Sphoeroides spengleri</i>	

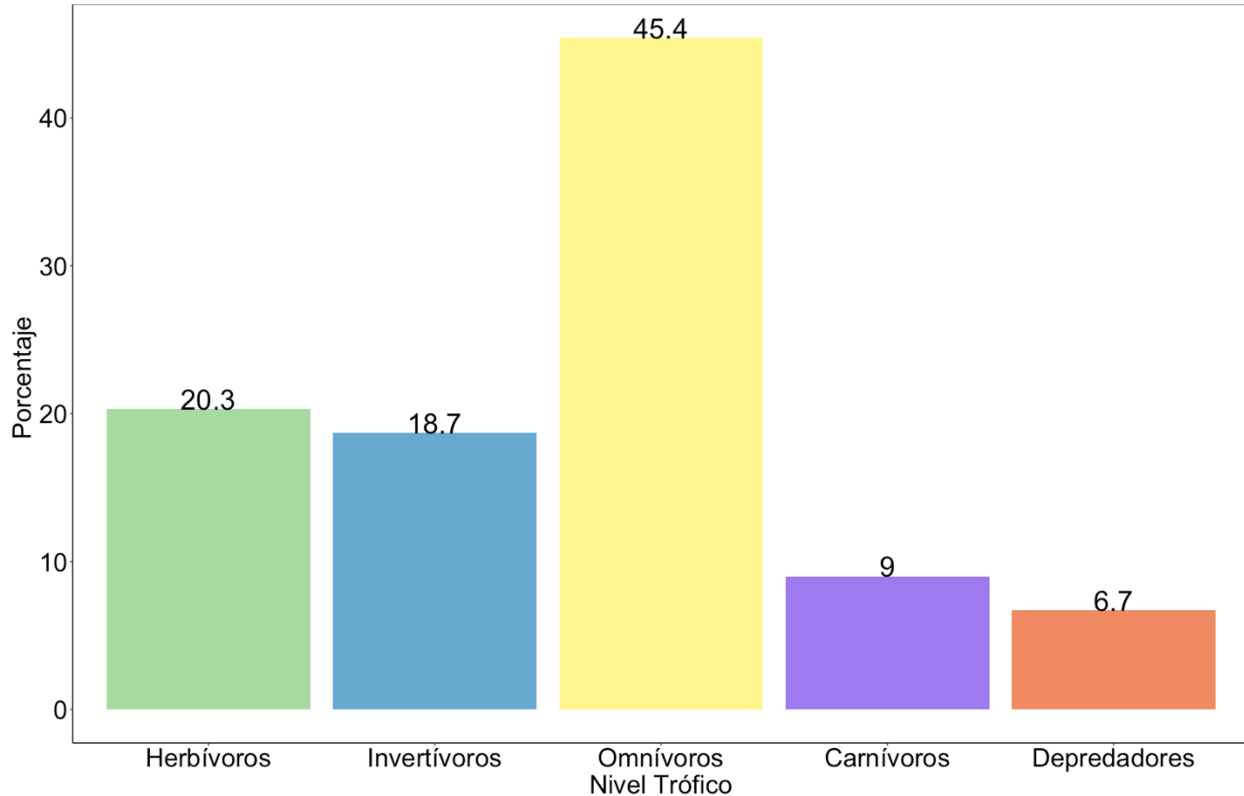


Figura 22. Proporción de peces en los diferentes niveles tróficos, registrados en los 111 sitios en evaluados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Los tres índices de diversidad específica de Hill (N0, N1 y N2) para los peces indican que de manera general no hay diferencias significativas entre las diferentes zonas: zona núcleo norte, zona núcleo sur y zona de amortiguamiento (**Figura 23**). También se presentan las distribuciones espaciales de la riqueza de especies de peces (N0) y de diversidad de Hill (N1 y N2), respectivamente, en los sitios muestreados en 2022 en la plataforma arrecifal del PNAA y los patrones espaciales no son evidentes, sin embargo, se observa menor diversidad de peces en el arrecife frontal del sur este (**Figura 24** y **Figura 25**).

Los hábitats con mayor riqueza (N0) y balance de abundancia (N1 y N2) de especies de peces son los mismos hábitats que para los corales, es decir hábitats con estructuras coralinas (**Tabla 10**). El hábitat con menor riqueza (N0) y balance de abundancia (N1 y N2) de especies de peces es el de pastos densos (**Tabla 10**).

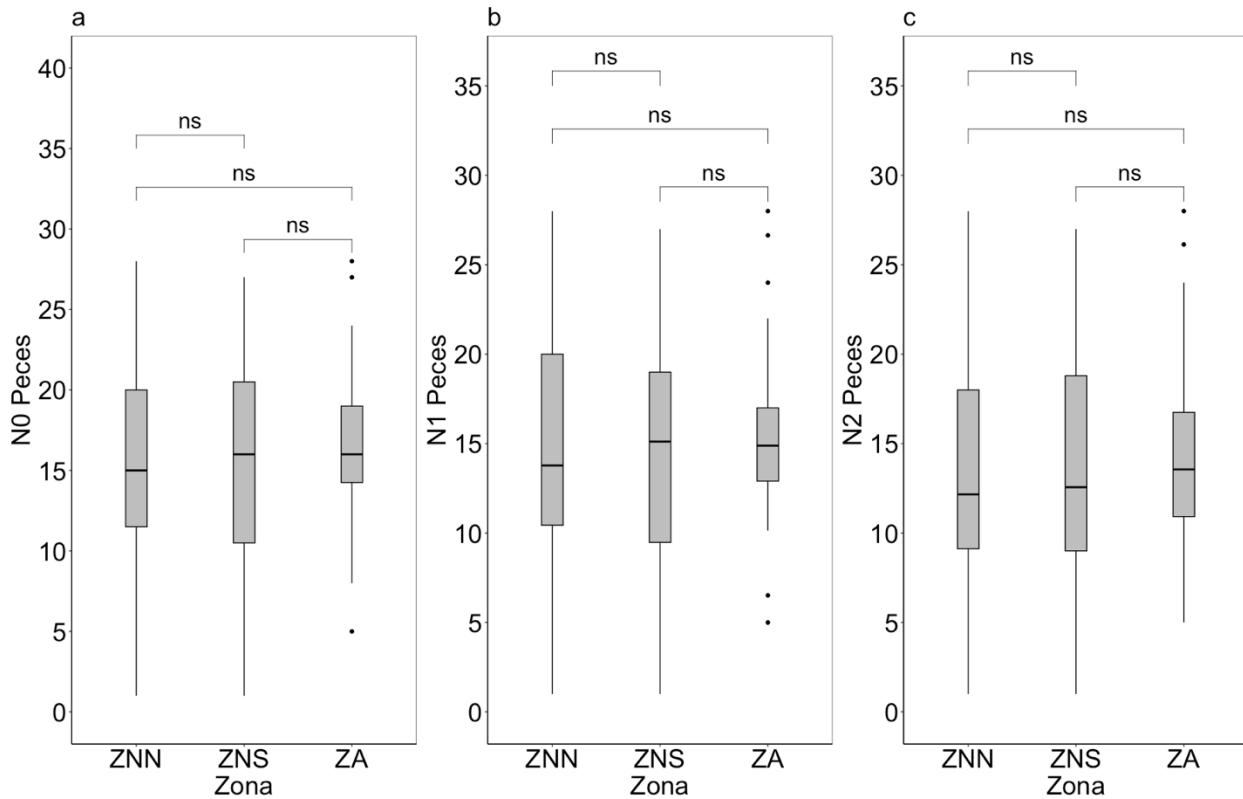


Figura 23. Comparación de los números de diversidad de Hill (N0, N1 y N2) para las especies de peces en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

Tabla 10. Promedio y desviación estándar de los números de diversidad de Hill de peces (N0P, N1P y N2P) en función de los nueve hábitats marinos descritos en este estudio. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

Hábitat	\bar{X}_{N0P}	SD_{N0P}	\bar{X}_{N1P}	SD_{N1P}	\bar{X}_{N2P}	SD_{N2P}
1 ECB	21	5	3	1	3	1
2 ECC	16	5	3	1	3	1
3 ECT	19	5	4	2	4	2
4 EBM	19	5	4	2	4	2
5 AFM	17	3	4	1	4	1
6 AFO	15	2	3	1	3	1
7 PCP	13	6	2	1	2	1
8 PMD	5	5	0	1	0	1
9 PAA	15	2	3	2	3	2

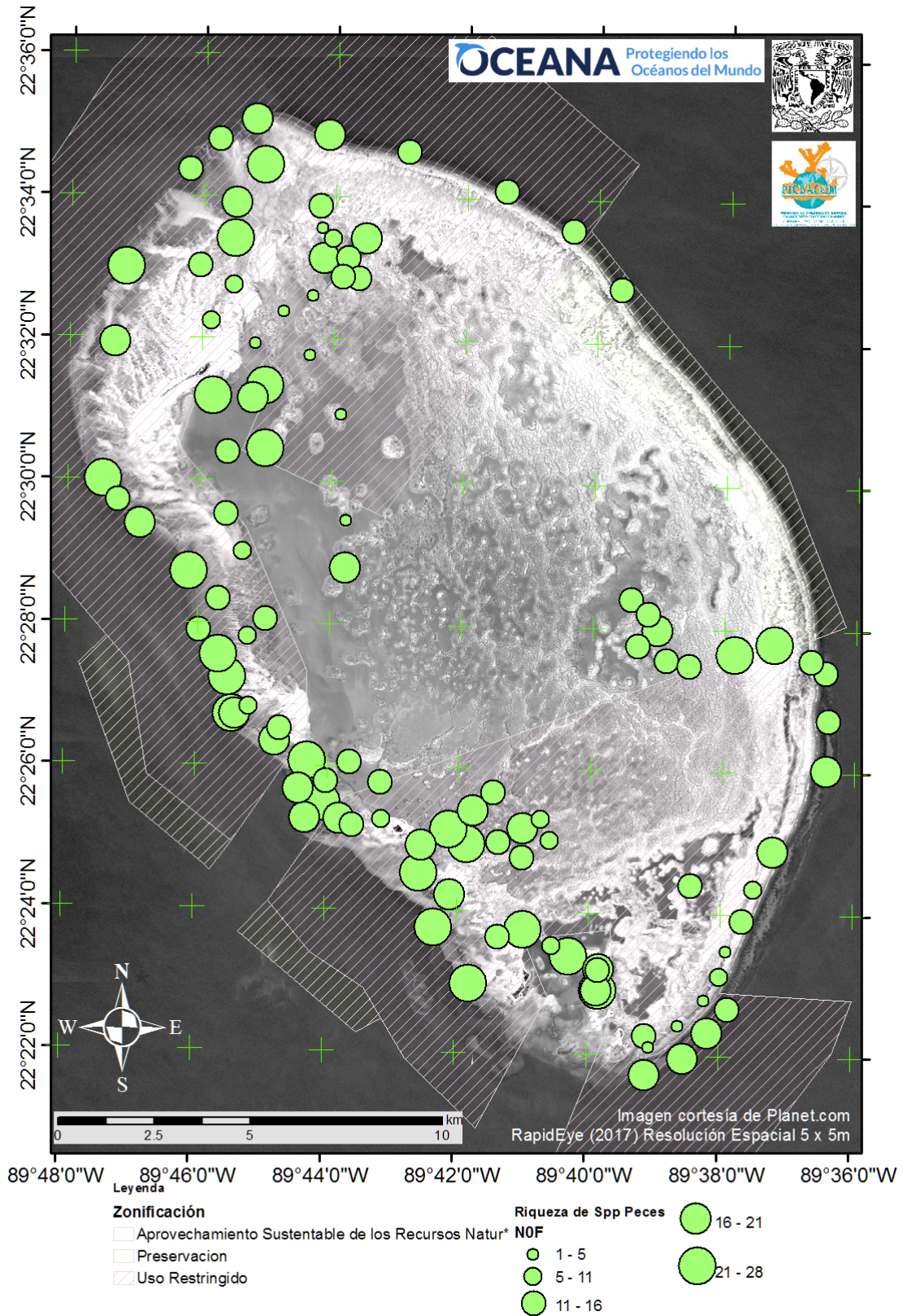


Figura 24. Riqueza específica de (N0) de peces, registrada en los sitios muestreados en mayo, julio y agosto de 2022.

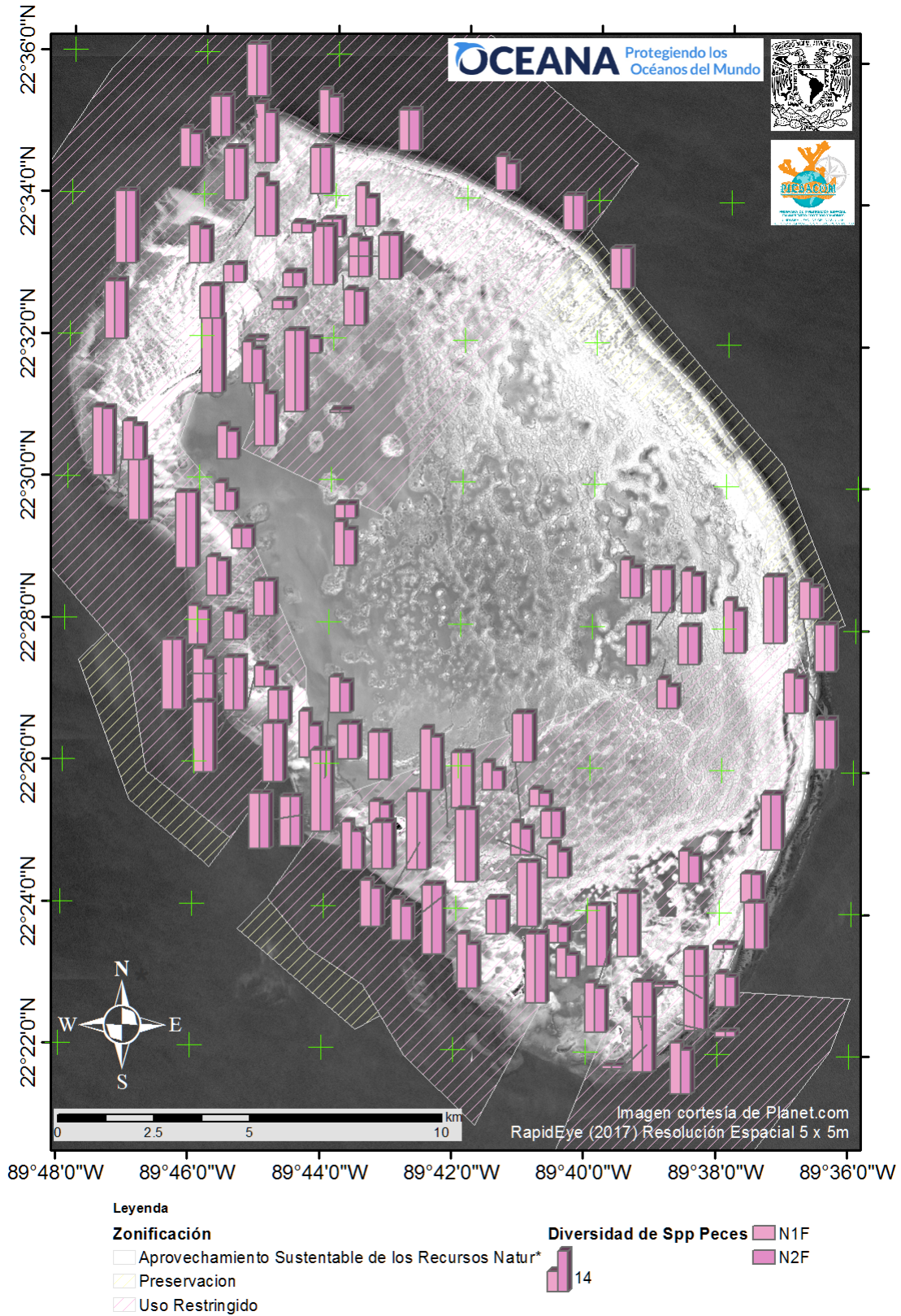


Figura 25. Diversidad de Hill de peces (N1 y N2), registrada en los sitios muestreados en mayo, julio y agosto de 2022.

El análisis integral muestra poca diferenciación de los hábitats al discriminar los sitios en función de sus ensambles de peces (**Figura 26**). Sin embargo, se puede ver una tendencia a que los hábitats con estructuras coralinas compartan algunas similitudes en su ensamblaje de peces, así como las zonas de arrecife posterior y barlovento, y las zonas con pocas estructuras coralinas (**Figura 26**). Los índices de diversidad de Hill están todos correlacionados y mayormente asociados con sitios del arrecife frontal y barlovento (**Figura 26**).

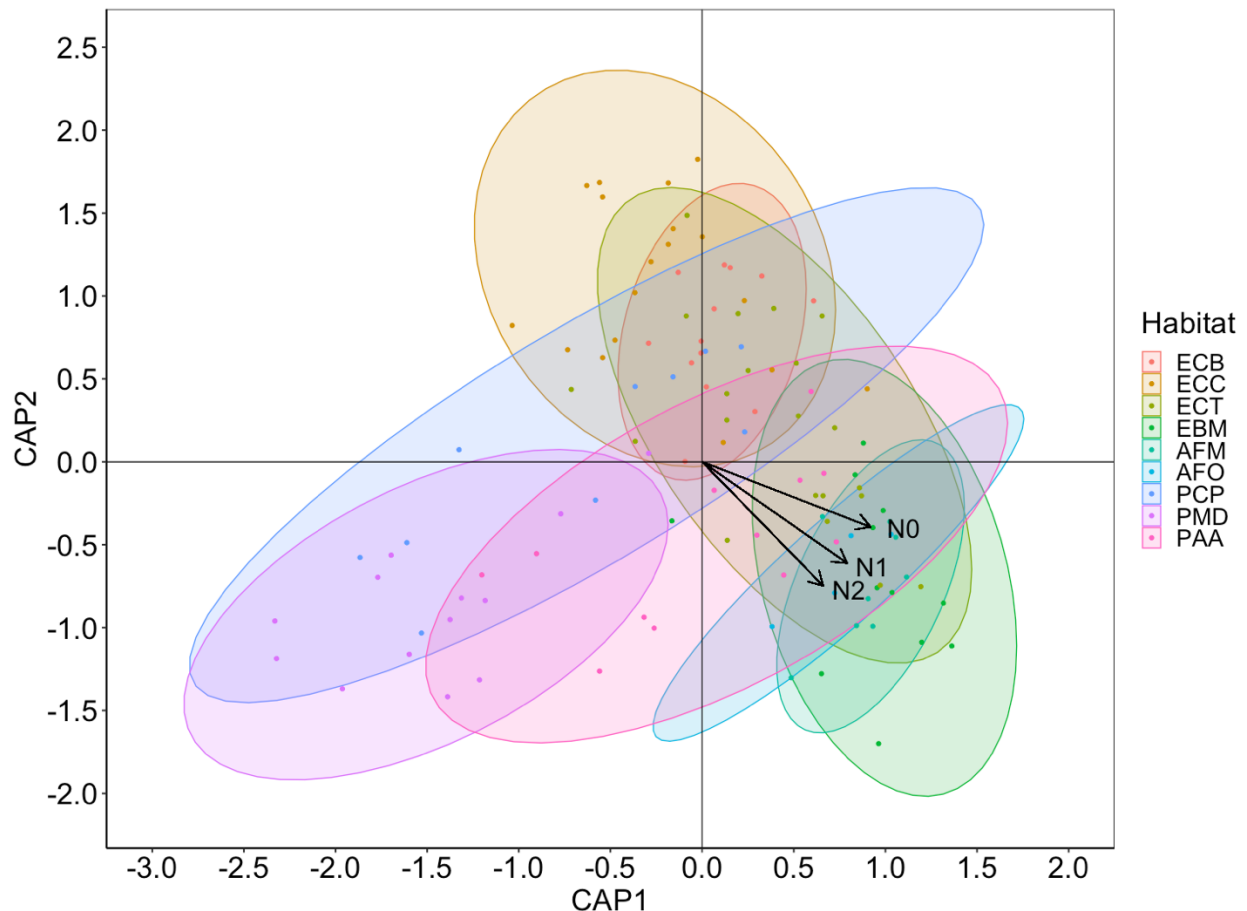


Figura 26. Análisis canónico de coordenadas principales de la abundancia de especies de peces en función de los hábitats marinos descritos en este estudio ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. Los números de diversidad de Hill (N0, N1 y N2) se proyectaron en el espacio multidimensional.

7.3. Salud arrecifal

Condición Coralina

Integrando todos los sitios monitoreados, el 85% de la totalidad de colonias de corales duros monitoreados (20,565) tienen una condición normal. La condición de afectación más alta es la mortalidad vieja, al ocupar un 9% de afectación total en el PNAA. También se observaron 2% de las colonias blanqueadas, 2% de las colonias pálidas y menos de 1% de las colonias padeciendo alguna enfermedad (**Figura 27**).

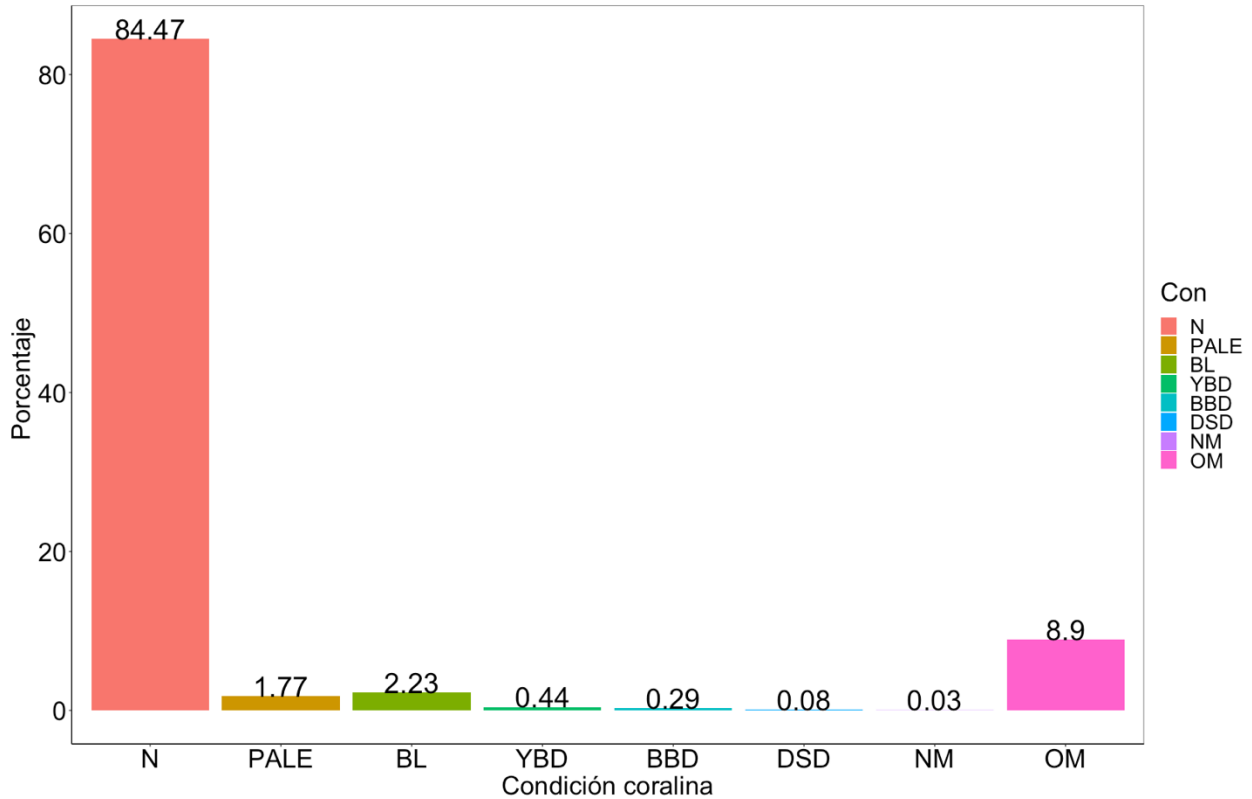


Figura 27. Porcentaje de la condición coralina global en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. %N es porcentaje de colonias con condición normal, %Pale es porcentaje de colonias con palidez, %BL es porcentaje de colonias blanqueadas, %YBD es porcentaje de colonias con banda amarilla, %BBD es porcentaje de colonias con banda negra, %DSD es porcentaje de colonias con puntos oscuros, %NM es porcentaje de colonias con mortalidad reciente y %OM es porcentaje de colonias con más de 40% de mortalidad antigua.

La estrategia coralina con mayor afectación (10%) es la estrés-tolerante (**Figura 28**), que es la más abundante también y es afectada por todas las condiciones encontradas que afectan la salud arrecifal (blanqueamiento, enfermedades y mortalidad). Le sigue la estrategia ruderal (2.32%) y la estrategia menos afectada es la estrategia competitiva, con una afectación cercana al 0.25% (**Figura 28**). La distribución espacial de la incidencia de enfermedades coralinas (**Figura 29**) y blanqueamiento no muestra ningún patrón espacial claramente definido, sin embargo, se observa menor afectación de enfermedades en el norte que en el sur (**Figura 30**).

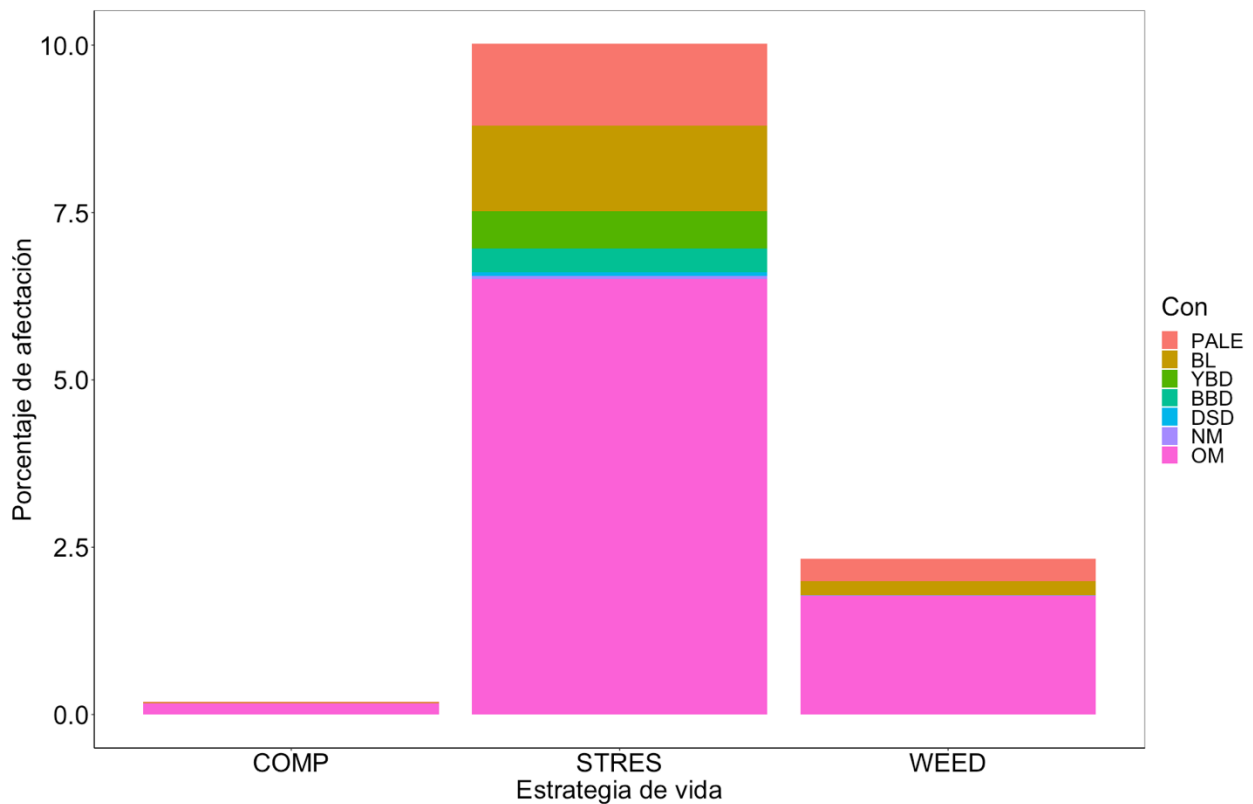


Figura 28. Porcentaje de la condición coralina en función de las estrategias de vida coralina. %N es porcentaje de colonias con condición normal, %Pale es porcentaje de colonias con palidez, %BL es porcentaje de colonias blanqueadas, %YBD es porcentaje de colonias con banda amarilla, %BBD es porcentaje de colonias con banda negra, %DSD es porcentaje de colonias con puntos oscuros, %NM es porcentaje de colonias con mortalidad reciente y %OM es porcentaje de colonias con más de 40% de mortalidad antigua.

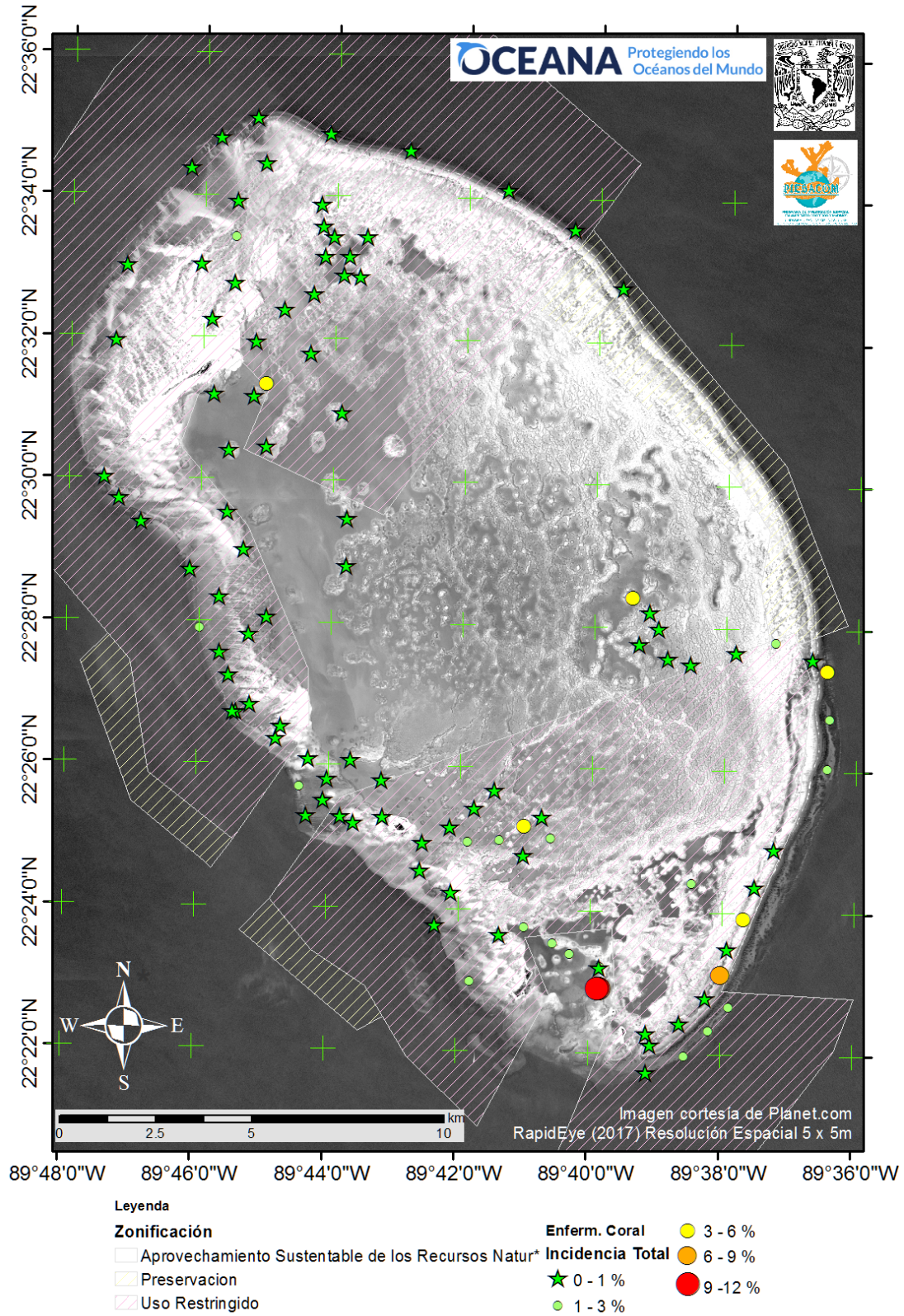


Figura 29. Distribución espacial de la incidencia de enfermedades coralinas en los sitios muestreados en mayo, julio y agosto de 2022 en la plataforma del PNAA.

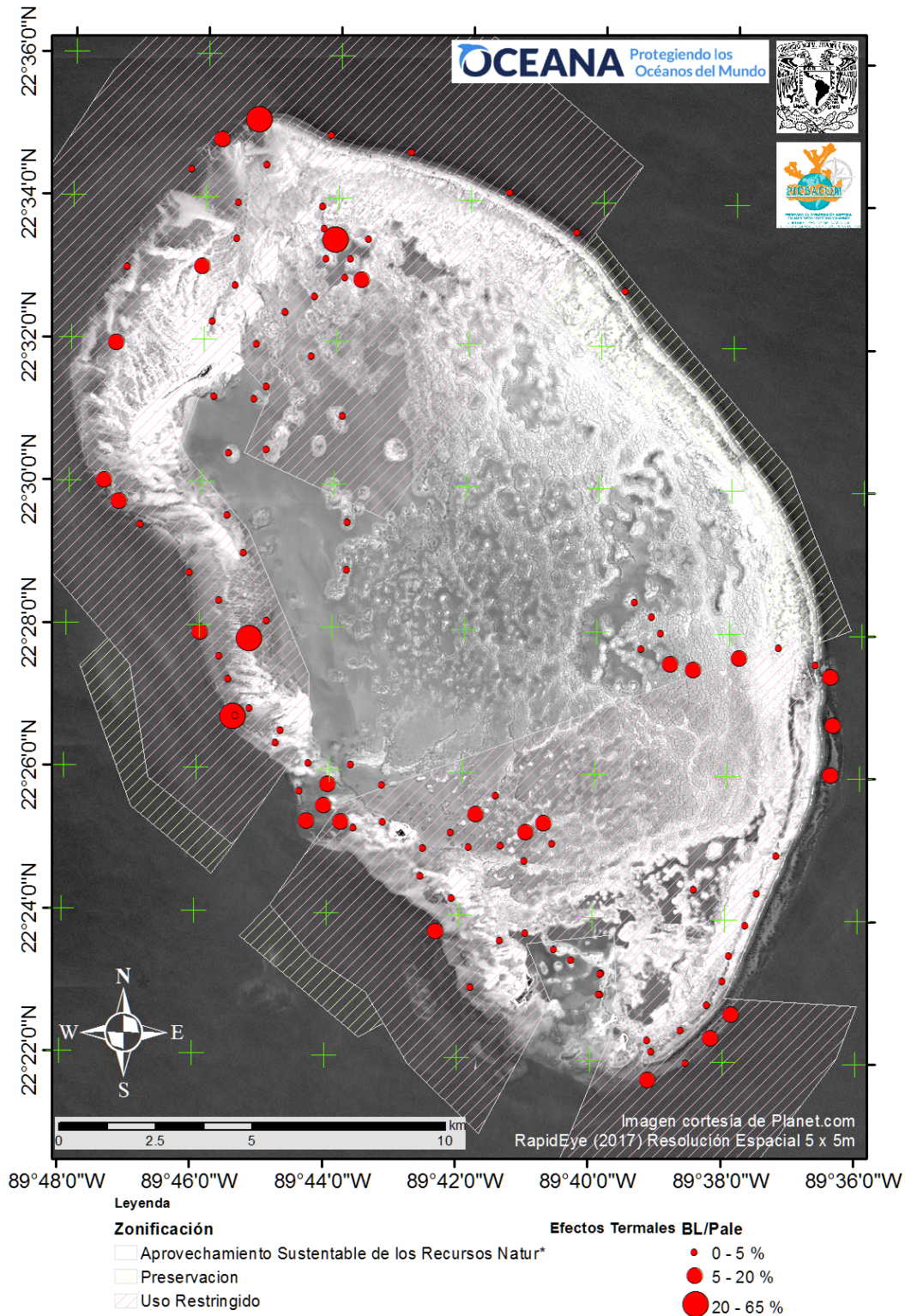


Figura 30. Distribución espacial de colonias con registros de afectaciones termales (blanqueadas parcialmente y pálidas) en los sitios de muestreo de mayo, julio y agosto de 2022.

El hábitat con mayor porcentaje de colonias normales es el arrecife posterior con octocorales, con en promedio 90% de sus colonias con una condición normal (**Tabla 11**). Los hábitats con mayor afectación de blanqueamiento (palidez y blanqueamiento) coinciden con hábitats con alto porcentaje de algas (EBM, AFM y PAA). En general no hay mucha afectación por enfermedades en ningún hábitat, y solo se identificaron tres enfermedades afectando los corales del PNAA: la banda amarilla, la banda negra y los puntos oscuros (**Tabla 11**). La mortalidad antigua es el porcentaje de afectación más alto (**Tabla 11**), particularmente en hábitats con estructuras coralinas (ECB y ECC) y con pastos densos (PMD).

Tabla 11. Porcentaje de condición coralina en función de los diez hábitats marinos descritos en este estudio. %Pale es porcentaje de colonias con palidez, %BL es porcentaje de colonias blanqueadas, %YBD es porcentaje de colonias con banda amarilla, %BBD es porcentaje de colonias con banda negra, %DSD es porcentaje de colonias con puntos oscuros, %NM es porcentaje de colonias con mortalidad reciente y %OM es porcentaje de colonias con más de 40% de mortalidad antigua. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas. El signo #, corresponde al número de colonias.

Hábitat	#	%Normal	Blanqueamiento		Enfermedades			Mortalidad	
			%Pale	%BL	%YBD	%BBD	%DSD	%NM	%OM
ECB	6581	85	0	1	2	0	0	0	11
ECC	3550	84	2	2	1	0	0	0	11
ECT	4406	88	2	2	0	0	0	0	9
EBM	2326	87	5	2	0	0	0	0	5
AFM	532	83	4	4	0	1	1	0	8
AFO	561	90	3	0	0	0	0	0	6
PCP	1278	82	0	1	0	0	0	0	7
PMD	443	80	0	0	0	0	0	0	13
PAA	888	84	1	7	1	0	0	0	7

El análisis integral muestra que hábitats dominados por macroalgas (AFM y EBM) tienen mayor afectación por palidez y enfermedades como banda negra y puntos oscuros, mientras que los parches coralinos (PCP) están asociados a la palidez, mortalidad nueva y vieja, y el blanqueamiento está más relacionado a los hábitats con estructuras coralinas (**Figura 31**).

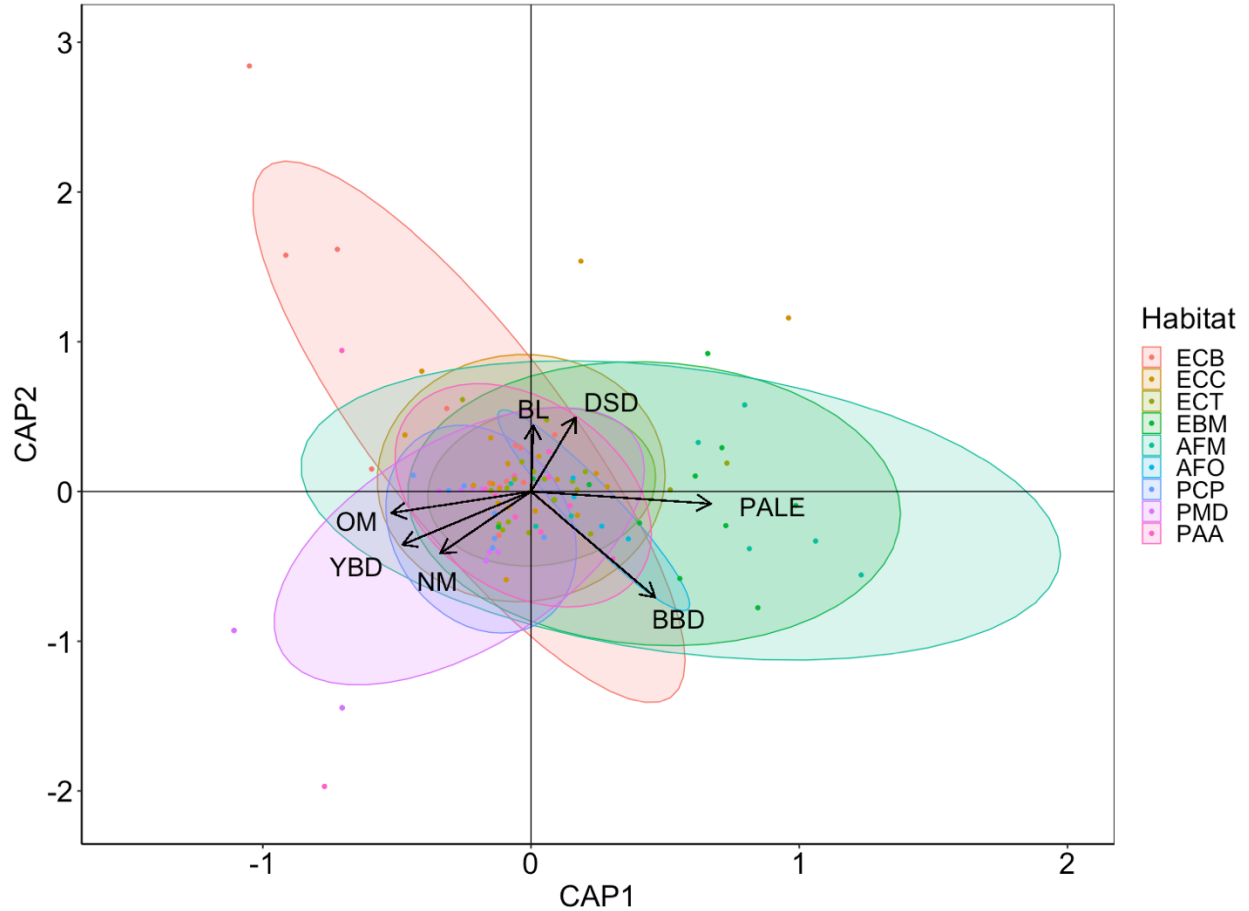


Figura 31. Análisis canónico de coordenadas principales de la condición de colonias coralinas en función de los hábitats marinos descritos en este estudio. Pale es palidez, BL es blanqueamiento, YBD es banda amarilla, BBD es banda negra, DSD es porcentaje puntos oscuros, NM es mortalidad reciente y OM es mortalidad antigua. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

En relación con la condición de los corales, las pruebas estadísticas revelan algunas diferencias significativas (**Figura 32**). Por ejemplo, la zona núcleo norte tiene menor afectación por enfermedades que las otras zonas y menor afectación de mortalidad que la zona núcleo sur (**Figura 32**).

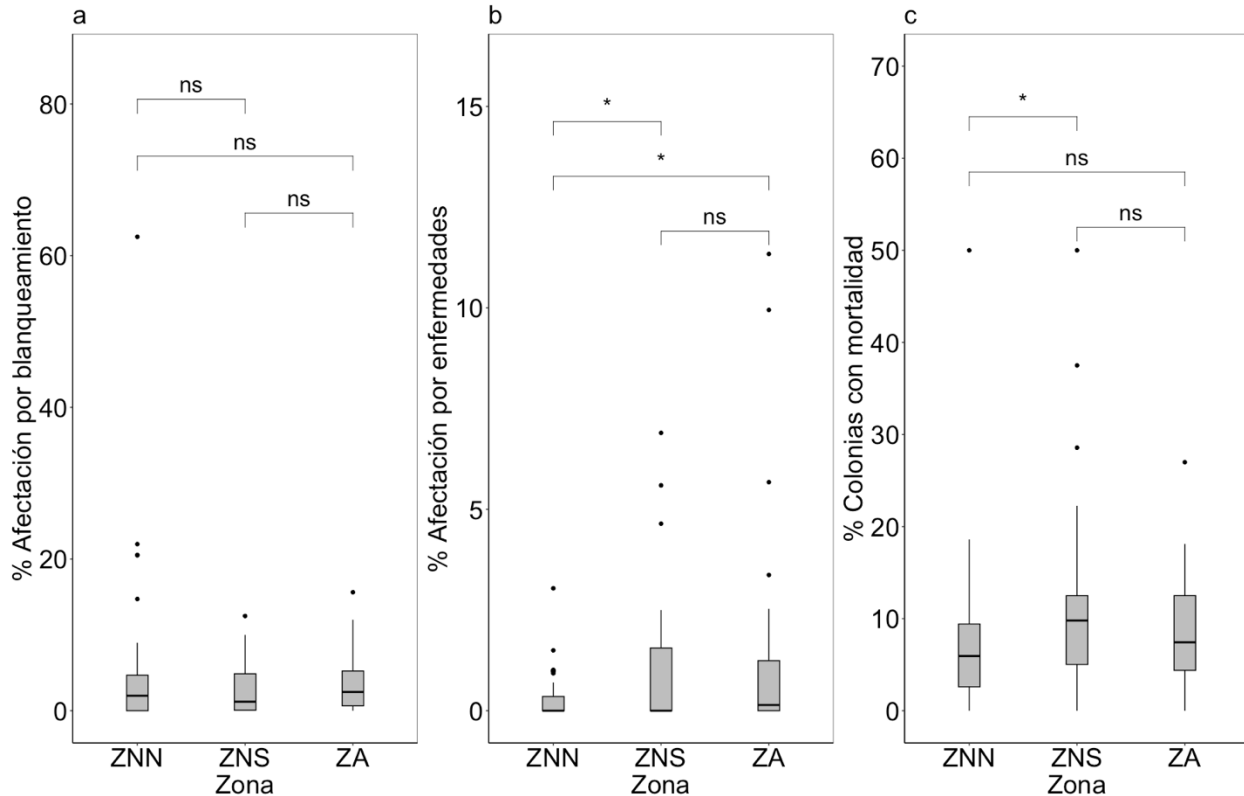


Figura 32. Comparación del porcentaje de afectación por blanqueamiento, por enfermedades y por mortalidad en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

Índice de Salud Arrecifal

En relación con el índice de salud arrecifal, se observa que, al incluir los 98 sitios coralinos monitoreados, el indicador de salud con menor calificación es la cobertura de corales duros, ya que solo el 20% de los sitios obtuvieron calificaciones en buen o muy buen estado (**Figura 33**). En el caso de los otros tres indicadores (cobertura de macroalgas, biomasa de peces herbívoros y peces comerciales), más del 50% obtuvieron calificaciones en buen o muy buen estado (**Figura 33**).

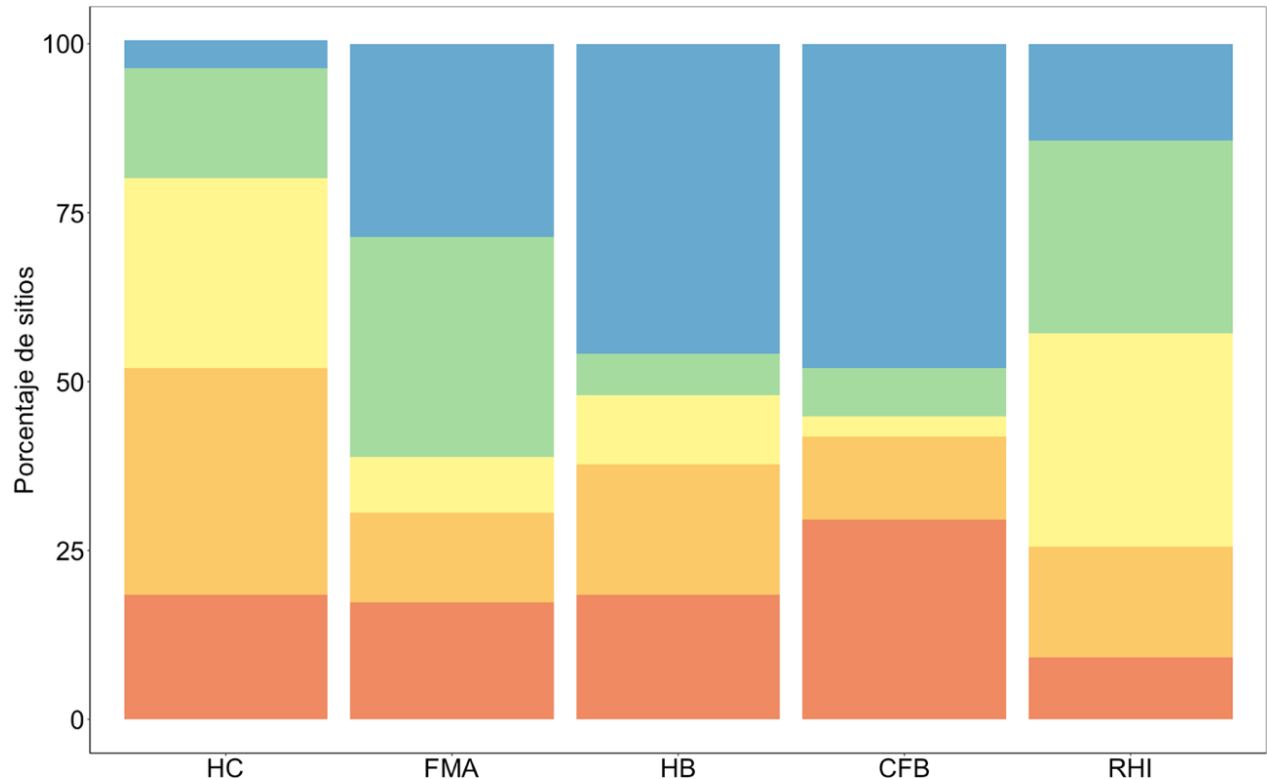


Figura 33. Calificación de los sitios del Parque Natural Arrecife Alacranes según los diferentes indicadores de salud. HC es porcentaje de coral duro, FMA es porcentaje de macroalgas carnosas, HB es biomasa de herbívoros, CFB es biomasa de peces comerciales y RHI es índice arrecifal de salud. Rojo es estado crítico, naranja es malo, amarillo es regular, verde es bueno y azul es muy bueno.

Los mapas temáticos por sitio para cada uno de los indicadores de salud arrecifal: cobertura de coral duro (**Figura 34**), cobertura de macroalgas (**Figura 35**), biomasa de peces herbívoros (**Figura 36**), biomasa de peces de importancia comercial (**Figura 37**), así como el índice de salud arrecifal (**Figura 38**) muestran heterogeneidad espacial y sin un patrón espacial definido, con sitios variando desde estado crítico a muy buen estado en las diferentes zonas de manejo del PNAA.

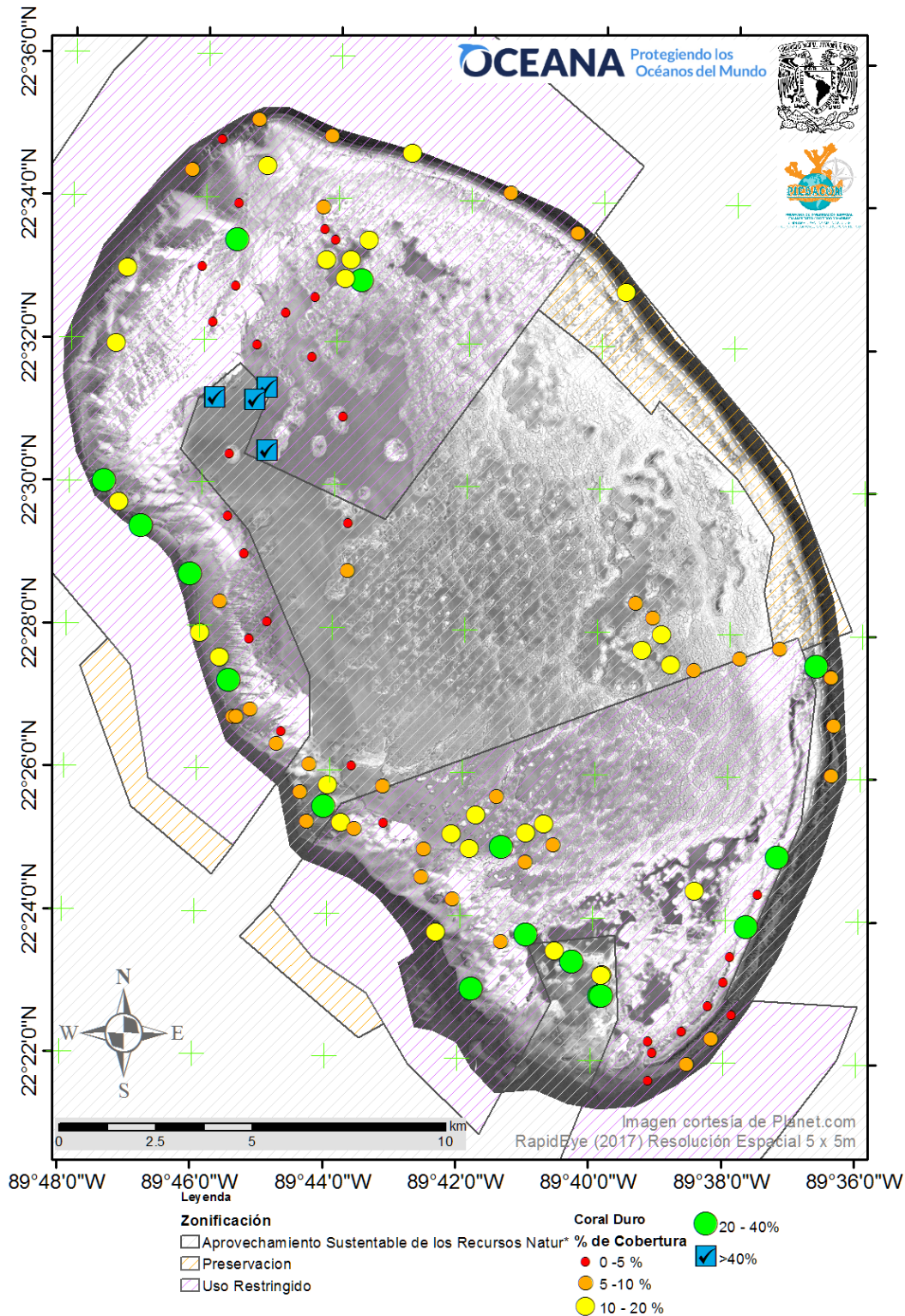


Figura 34. Coberturas coralinas en las estaciones muestreadas, categorizadas según la escala de Healthy Reefs: crítico (rojo) <5%, baja (anaranjado) entre 5.0 y 9.9%, razonable (amarillo) entre 10.0 y 19.9%, buena (verde) entre 20.0 y 39.9%, y muy buena (azul) ≥ 40%.

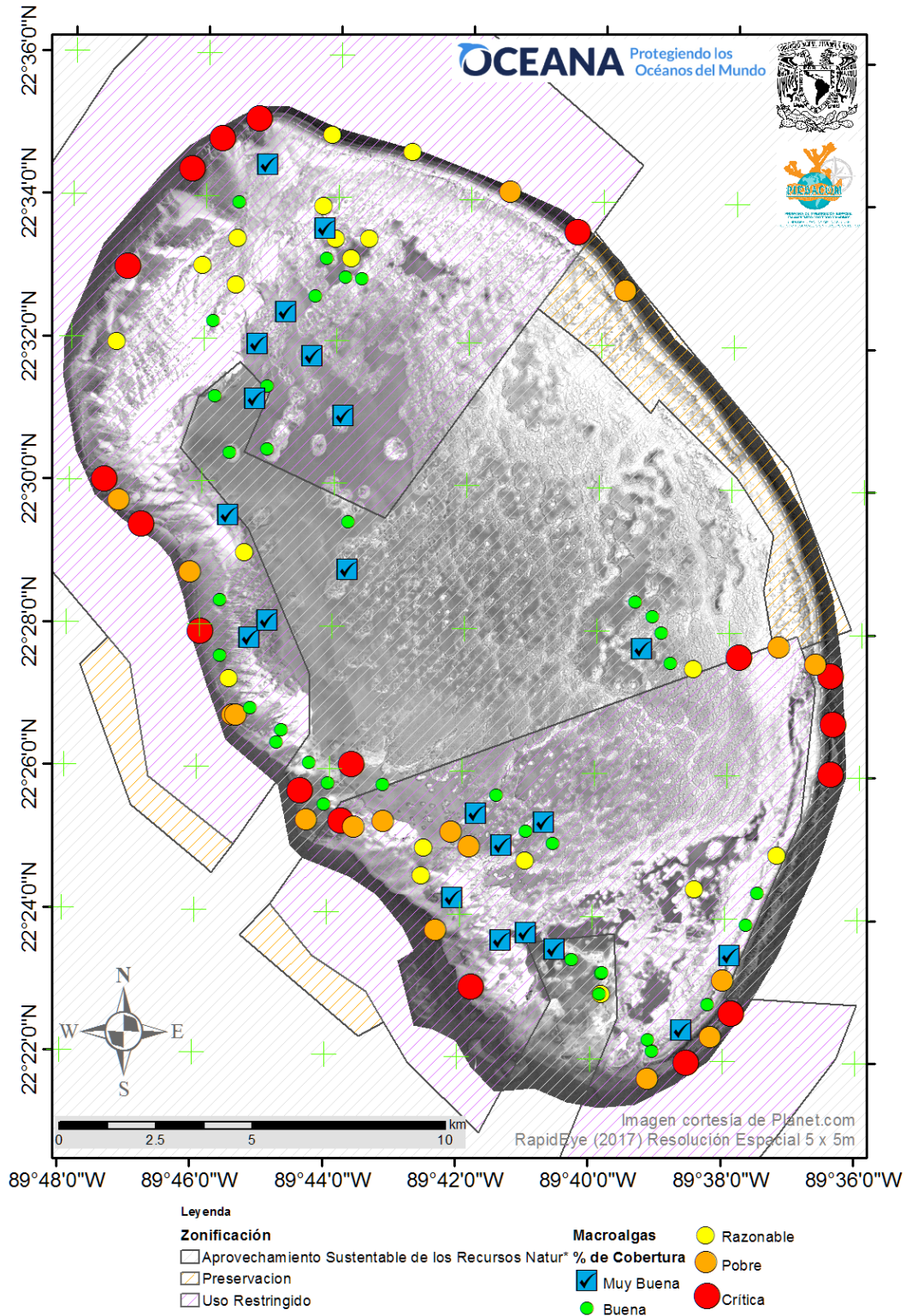


Figura 35. Coberturas de macroalgas en las estaciones muestreadas, categorizadas según la escala de Healthy Reefs: crítico (rojo) >25, baja (anaranjado) entre 12.1 y 25.0%, razonable (amarillo) entre 5.1 y 12.0%, buena (verde) entre 1.0 y 5.0%, y muy buena (azul) entre 0 y 0.9%.

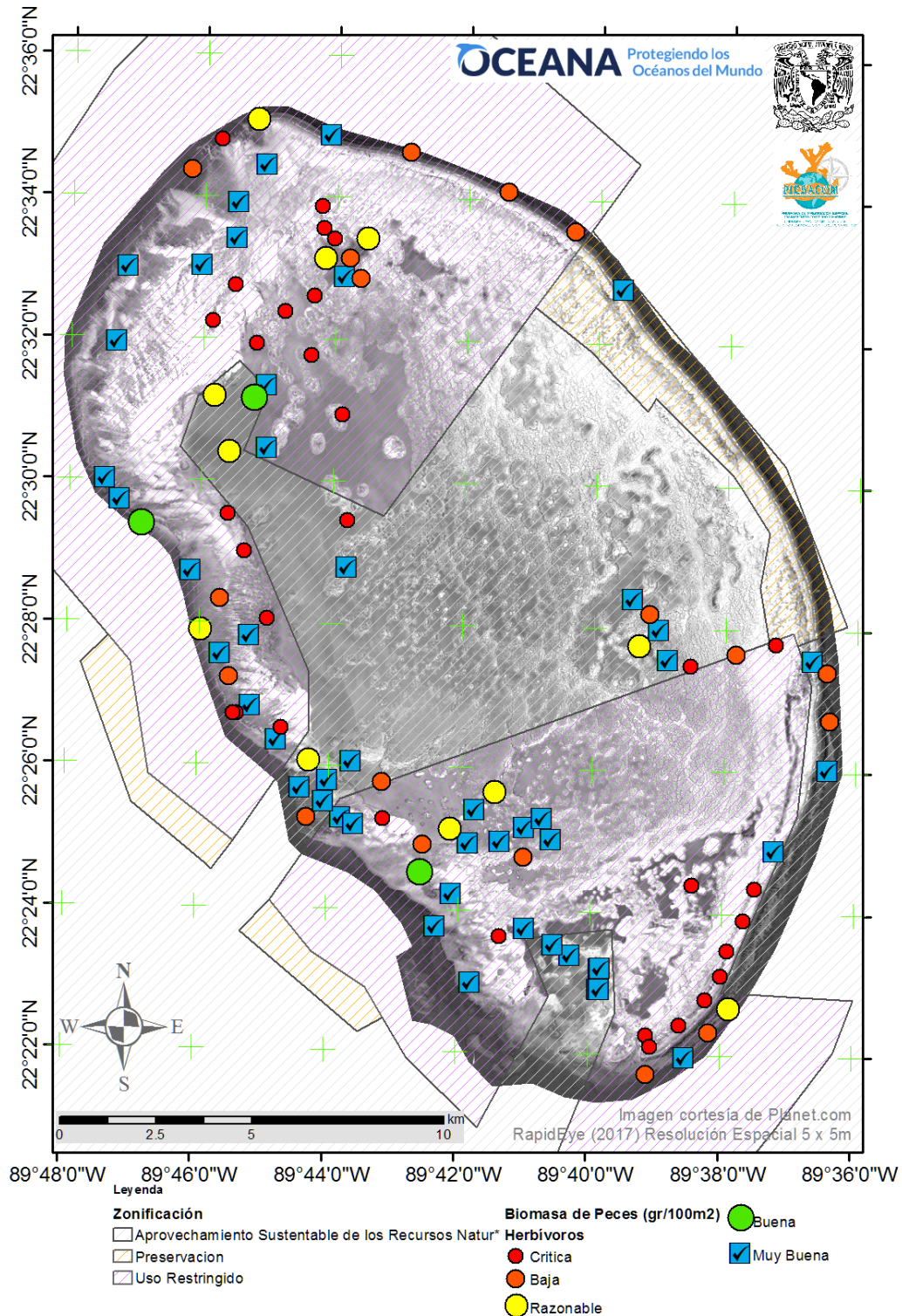


Figura 36. Biomasa (gr / 100 m²) de peces herbívoros (loros y cirujanos) registrada en las estaciones muestreadas, categorizadas según la escala de Healthy Reefs: crítica (rojo) < 960, baja (anaranjado) entre 960 y 1919, razonable (amarillo) entre 1920 y 2879, buena (verde) entre 2880y 3479, y muy buena (azul) ≥ 3480.

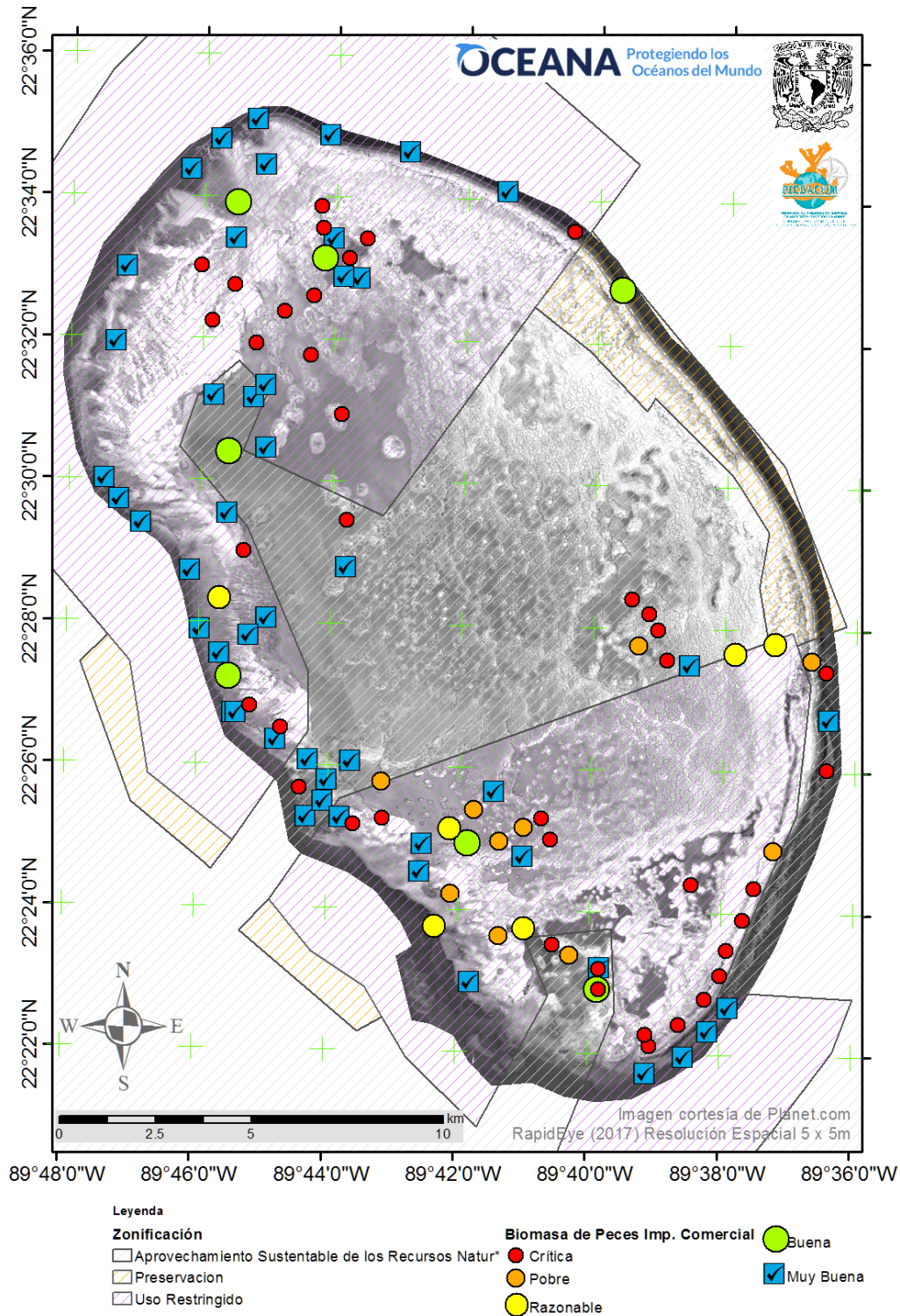


Figura 37. Biomasa (gr / 100 m²) de peces de importancia comercial (mero y pargos) registrada en las estaciones muestreadas, categorizadas según la escala de Healthy Reefs: crítica (rojo) < 420; baja (anaranjado) entre 420 y 839, razonable (amarillo) entre 840 y 1259, alta (verde) entre 1260 y 1679, y muy alta (azul) ≥1680.

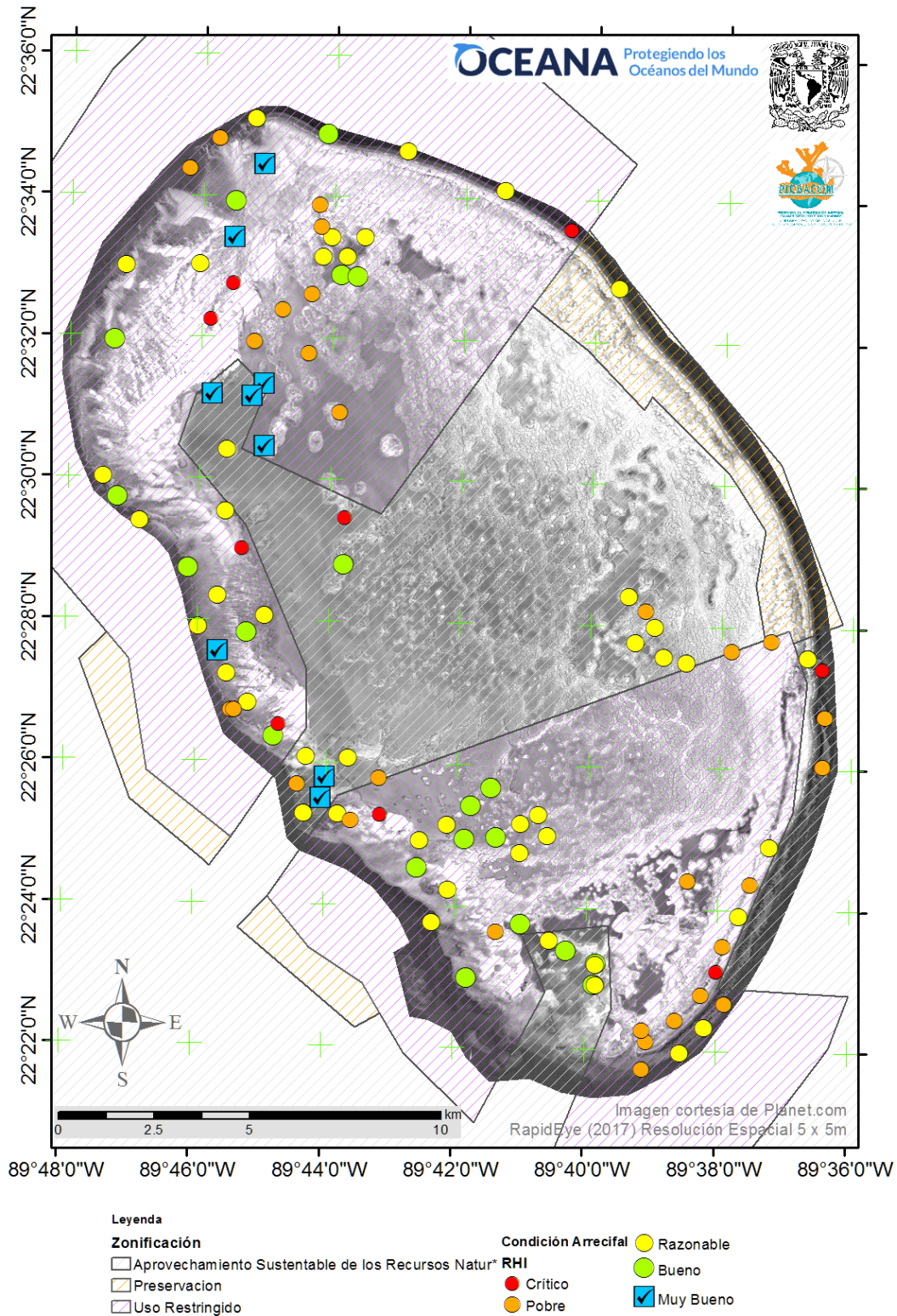


Figura 38. Calificación de cada sitio muestreado en la plataforma del PNAA en mayo, julio y agosto de 2022, según el indicador de salud arrecifal de Healthy Reefs: 1 es crítico (rojo), 2 es pobre (anaranjado), 3 es razonable (amarillo), 4 es bueno (verde) y 5 es muy bueno (azul).

Al estudiar el índice e indicadores de salud por hábitat, se observa que el hábitat con mayor salud arrecifal en promedio son ECB, al no tener ningún indicador en mal estado o crítico, y particularmente tener valores altos de cobertura coralina, baja cobertura de macroalgas carnosas y biomasa sanas de peces herbívoros (**Tabla 12**). Por otro lado, los hábitats con mala calificación son AFM y PCP, sobre todo por coberturas coralinas bajas y coberturas de macroalgas carnosas altas (**Tabla 12**).

El indicador que tiene más bajas calificaciones es la cobertura coralina (**Tabla 12**), que llega a niveles críticos en algunos hábitats (AFM y PAA). También la cobertura de macroalgas carnosas es en promedio alta en algunos hábitats (AFM, AFO y EBM), lo cual resulta en una baja calificación (**Tabla 12**). En el caso de las biomasa de peces herbívoros, en la mayoría de los hábitats, la calificación es buena, a excepción del hábitat AFM donde la calificación es regular, y los hábitats PCP y PAA donde la calificación es mala (**Tabla 12**). Para los peces comerciales, la mayoría de los hábitats tienen calificaciones muy buenas y buenas, a excepción de los hábitats ECB y ECT donde la calificación es regular, y los hábitats ECC y PCP donde la calificación es mala (**Tabla 12**).

Tabla 12. Calificación promedio del estado de salud arrecifal de los diez hábitats marinos descritos en este estudio. HC es porcentaje de coral duro, FMA es porcentaje de macroalgas carnosas, HB es biomasa de herbívoros, CFB es biomasa de peces comerciales y RHI es índice arrecifal de salud. Rojo es estado crítico, naranja es malo, amarillo es regular, verde es bueno y verde oscuro es muy bueno. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

Hábitat	HC	FMA	HB	CFB	RHI
ECB	4.3	4.3	4.2	3.3	4.0
ECC	2.7	4.4	3.6	2.3	3.3
ECT	2.4	3.9	4.2	3.1	3.4
AFM	1.8	1.3	2.9	3.5	2.3
AFO	2.5	2.5	3.5	4.5	3.3
EBM	2.4	1.4	3.5	4.7	3.0
PCP	1.9	3.6	1.9	1.9	2.3
PAA	1.3	4.1	2.5	3.8	2.9

Las pruebas estadísticas en relación con los indicadores y el índice de salud arrecifal revelan únicamente diferencias significativas entre la zona núcleo norte y las otras zonas para el indicador de biomasa de peces comerciales (**Figura 39**). Sin embargo, a pesar de que no hay diferencias significativas entre zonas para otros indicadores, 40% de los sitios de la zona de amortiguamiento (12/30), obtuvieron calificaciones buenas o muy buenas en la mayoría de sus indicadores e índice (**Figura 40 y Tabla 13**).

Efectivamente las diferentes zonas de manejo tienen porcentajes parecidos de sitios con calificaciones de salud similares, por ejemplo, el porcentaje de sitios con una calificación regular es similar en las tres zonas (**Figura 40**). No obstante, la zona núcleo norte presenta un mayor porcentaje de sitios con buena y muy buena calificación, y un porcentaje menor de sitios con mala y crítica calificación (**Figura 40**). La zona núcleo sur tiene porcentajes muy similares a la zona de amortiguamiento, a excepción que no se encontraron sitios con una calificación muy buena en la zona núcleo sur (**Figura 40**). Sin embargo, en la zona de amortiguamiento se hallaron 23% de los sitios con calificación muy buena (**Figura 40 y Tabla 14**).

Tabla 14. Calificación promedio del estado de salud arrecifal de sitios con buena y muy buena calificación dentro de la zona de amortiguamiento. HC es porcentaje de coral duro, FMA es porcentaje de macroalgas carnosas, HB es biomasa de herbívoros, CFB es biomasa de peces comerciales y RHI es índice arrecifal de salud. Rojo es estado crítico, naranja es malo, amarillo es regular, verde es bueno y azul es muy bueno. ECB es estructuras coralinas con buenas coberturas, ECC es estructuras coralinas con dominancia de cianobacterias y algas, ECT es estructuras coralinas con dominancia de algas césped con sedimento, EBM es estructuras coralinas a barlovento con macroalgas, AFM es arrecife frontal con dominancia de macroalgas, AFO es arrecife frontal con dominancia de octocorales, PCP es parches de corales y pastos marinos, PMD es pasto marino denso y PAA es planicies de arena y algas.

	Sitio	Hábitat	HC	FMA	HB	CFB	RHI
1	AP15	ECB	4	4	5	1	3.5
2	IIM14	ECB	4	4	5	5	4.5
3	IIM15	ECC	3	5	5	5	4.5
4	IIM16	PAA	2	4	3	5	3.5
5	IIM3b	ECC	4	4	5	4	4.3
6	IIM4	ECB	4	4	5	2	3.75
7	IIM5	ECT	3	5	5	1	3.5
8	SR18	ECT	2	5	5	5	4.3
9	SR21	AFM	5	5	3	5	4.5
10	SR22	AFO	5	5	4	5	4.8
11	SR38	ECC	3	5	5	1	3.5
12	SR50b	EBM	3	4	5	5	4.3

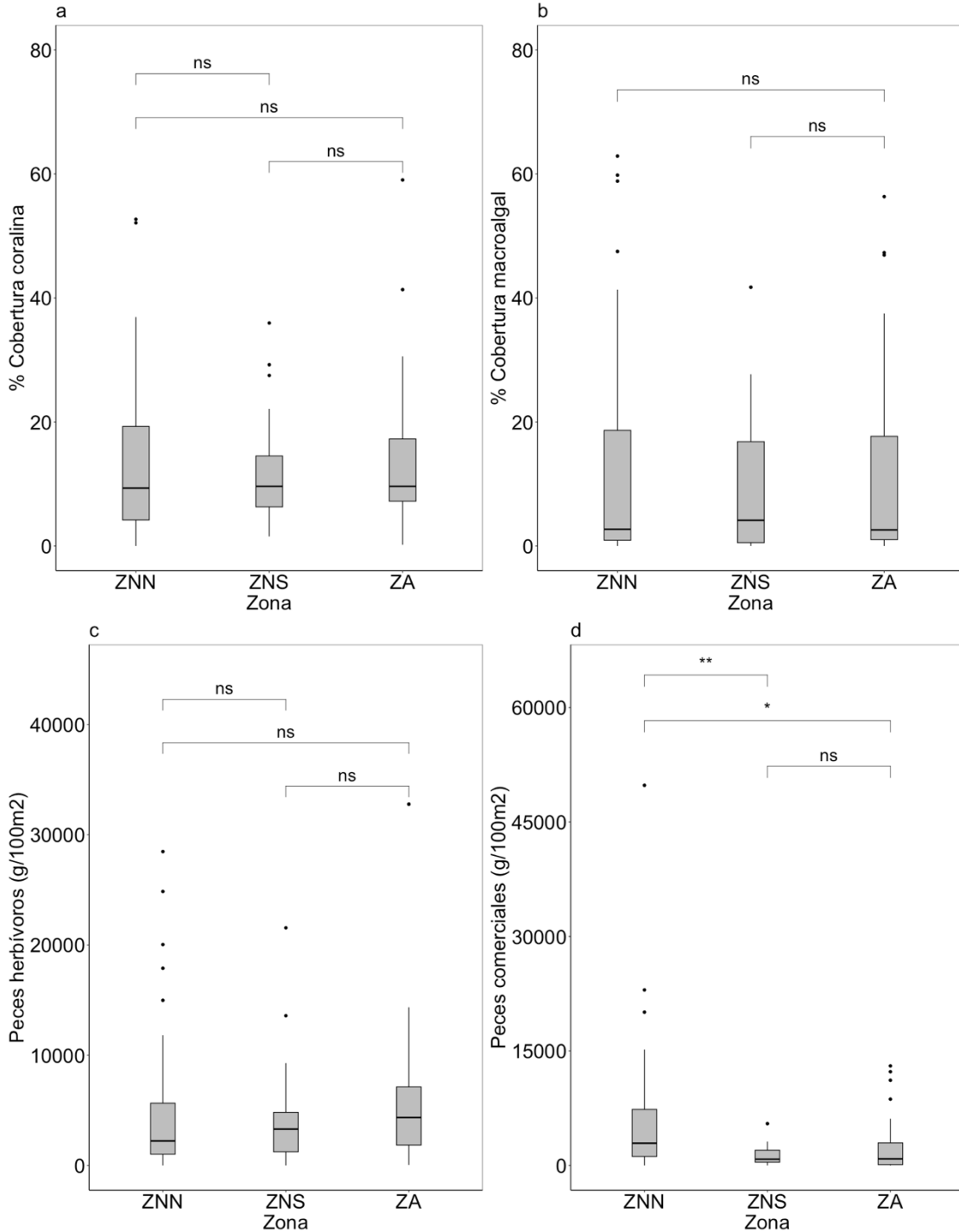


Figura 39. Comparación del porcentaje los indicadores de salud arrecifal en función de la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Las pruebas de Wilcoxon entre zonas están representadas por las barras horizontales, ns es no significativo y * es significativo.

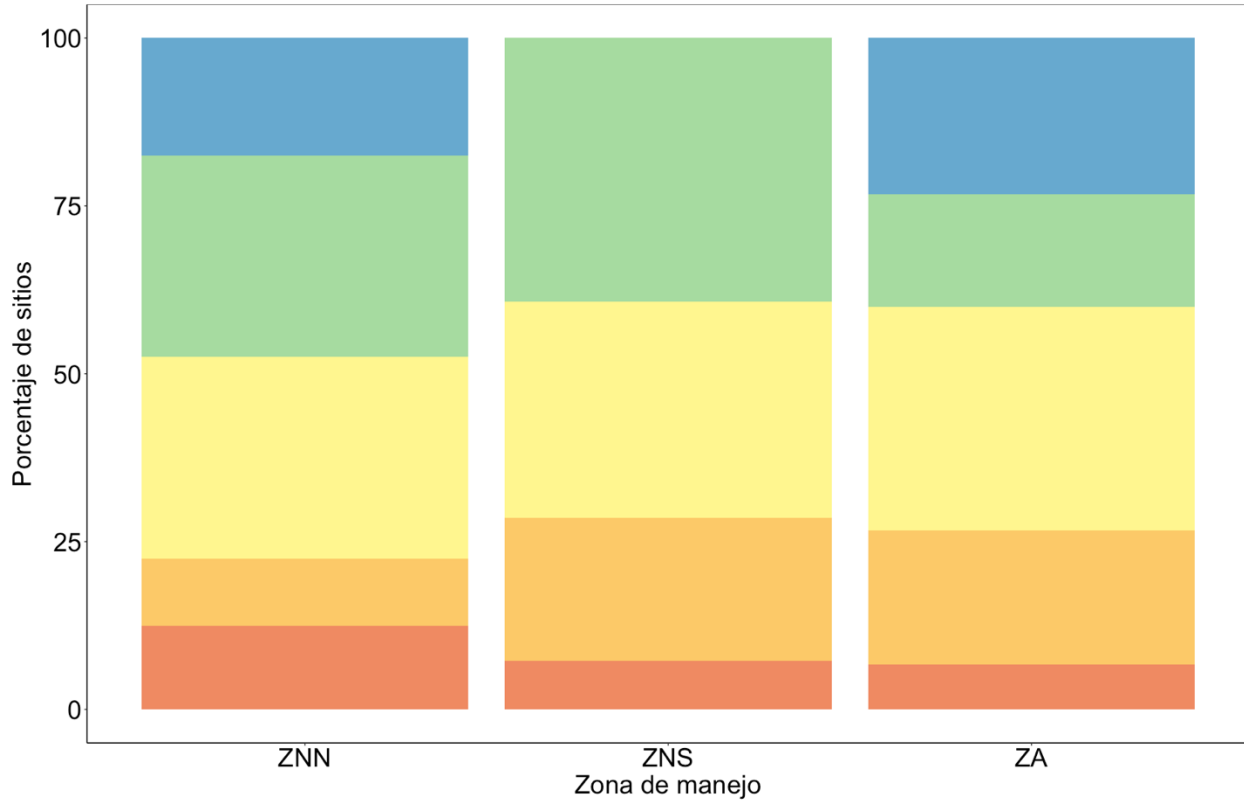


Figura 40. Calificación de los sitios del Parque Natural Arrecife Alacranes según la zona de manejo. ZNN corresponde a sitios en la zona núcleo norte, ZNS a sitios en la zona núcleo sur y ZA a sitios en la zona de amortiguamiento. Rojo es estado crítico, naranja es malo, amarillo es regular, verde es bueno y azul es muy bueno.

7.4. Cambios temporales

Cambios de biomasa

La distribución espacial de biomasa total de peces, de peces herbívoros, y de peces de importancia comercial (meros y pargos) y otras especies de interés comercial (como hemúlidos y el boquinete *Lachnolaimus maximus*) para los sitios muestreados en 2022 muestra una tendencia a mayores valores de biomasa en el norte del PNAA, particularmente en la zona núcleo norte (**Figura 41** y **Figura 42**).

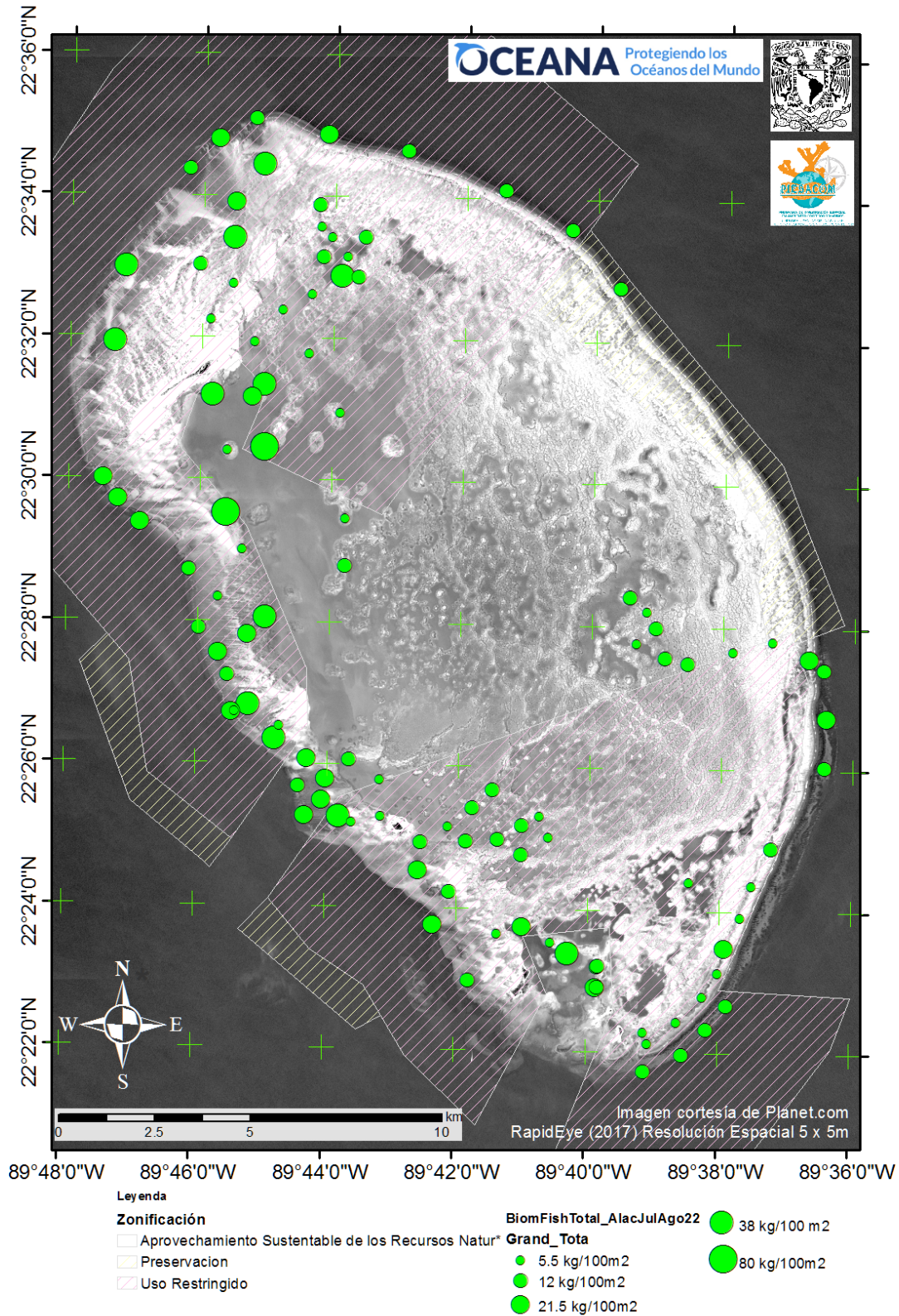


Figura 41. Biomasa total de peces registrada (kg/100m²) en las estaciones muestreadas en el PNAA en mayo, julio, agosto de 2022.

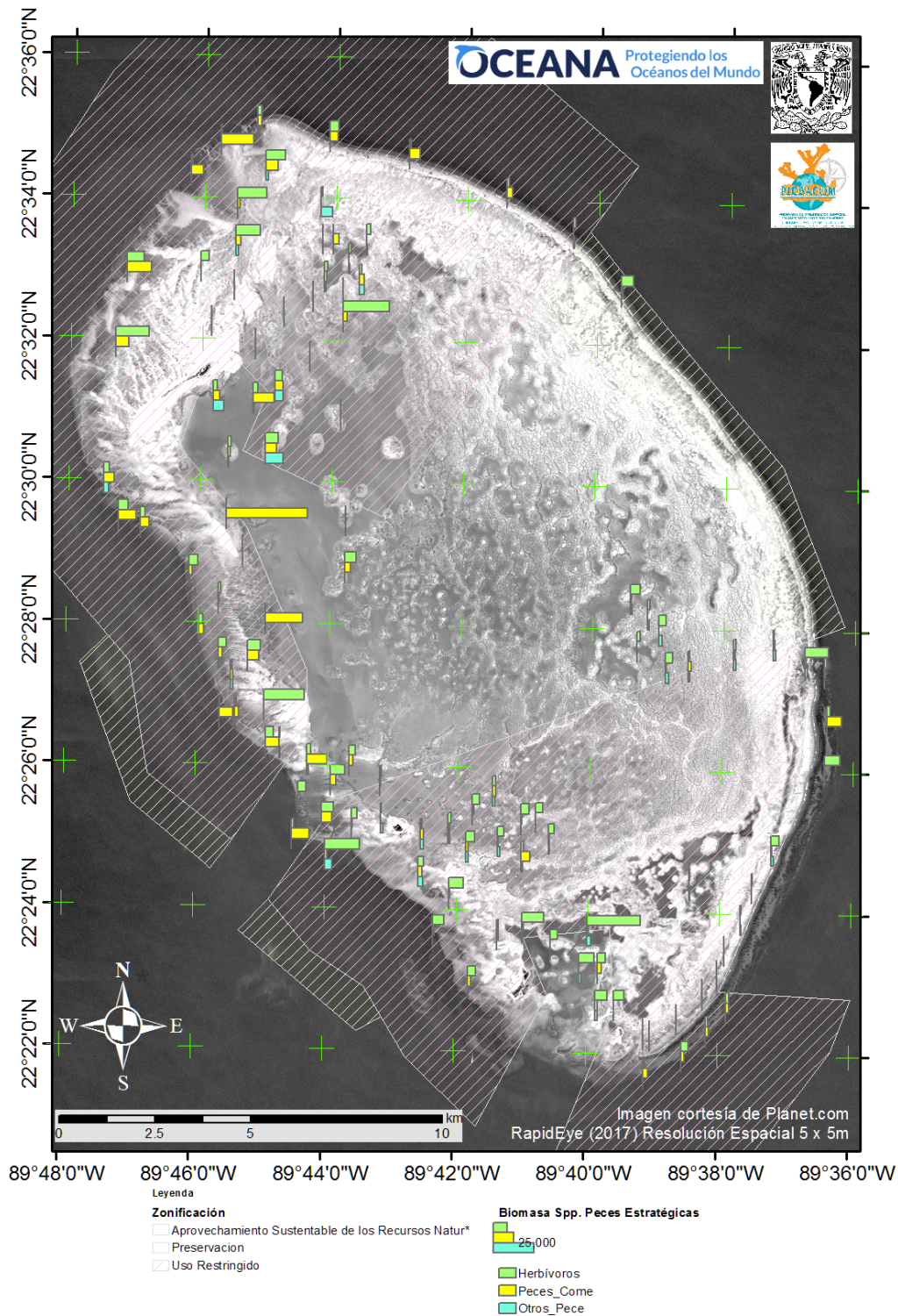


Figura 42. Biomasa peces de especies estratégicas (loros, cirujanos, meros, pargos, hemúlidos, boquinete) registrada en las estaciones muestreadas en el PNAA en mayo, julio, agosto de 2022.

Al analizar los cambios en los ensamblajes de peces entre sitios en función de los años de monitoreo (1998 y 2022), se observa que en el diagrama de ordenación hay un traslape de ciertos sitios, pero que de forma general los sitios se diferencian entre 1998 y 2022 (**Figura 43**). Por lo cual, se evaluaron los cambios de biomasa entre 1998 y 2022 para cada grupo trófico y grupo clave para la salud arrecifal (herbívoros y peces comerciales). Considerando los cinco grupos tróficos estudiados, hay diferencias significativas de biomasa entre 1998 y 2022 para los carnívoros, invertívoros y biomasa total, siendo estos valores significativamente superiores en 2022 que en 1998 (**Figura 44**).

No obstante, al estudiar únicamente los indicadores de salud arrecifal, no se observan cambios significativos incluyendo todos los sitios (**Figura 45**), ni tampoco comparando únicamente los sitios en la zona núcleo norte y sur (**Figura 46 y 47**). En el caso de la zona de amortiguamiento, si se observaron diferencias significativas entre 1998 y 2022 para las biomasa de los herbívoros claves, es decir los peces loro y cirujanos, con un aumento de biomasa en 2022 (**Figura 48**).

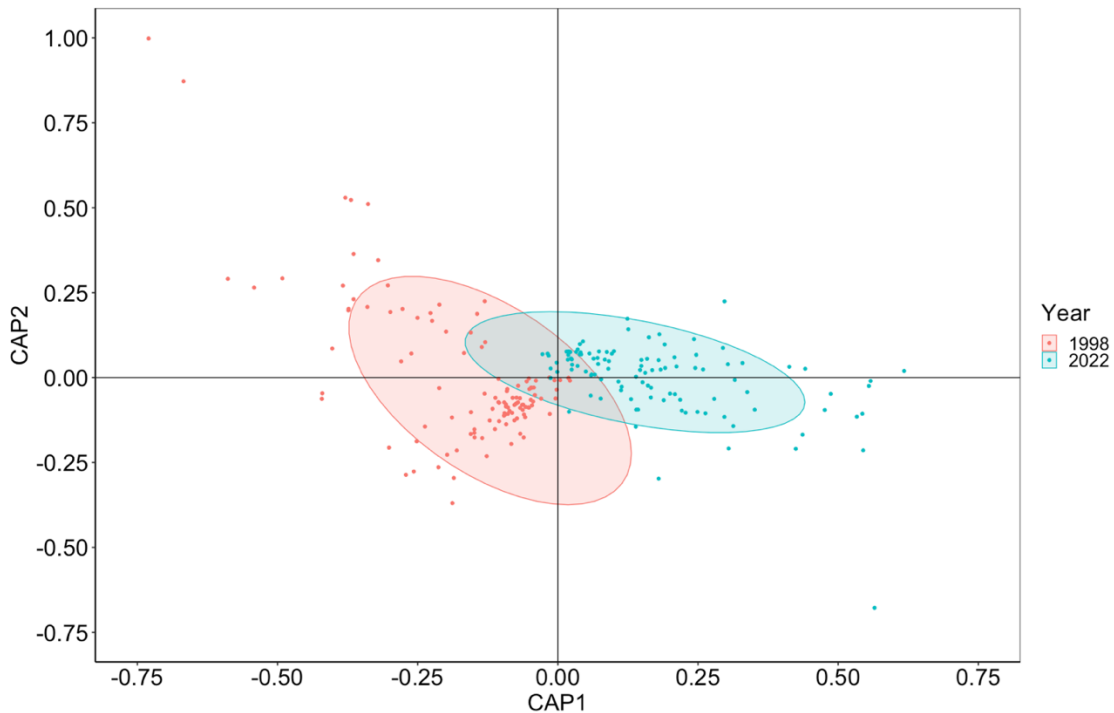


Figura 43. Análisis canónico de coordenadas principales de las biomasa de peces en función de los años de monitoreo.

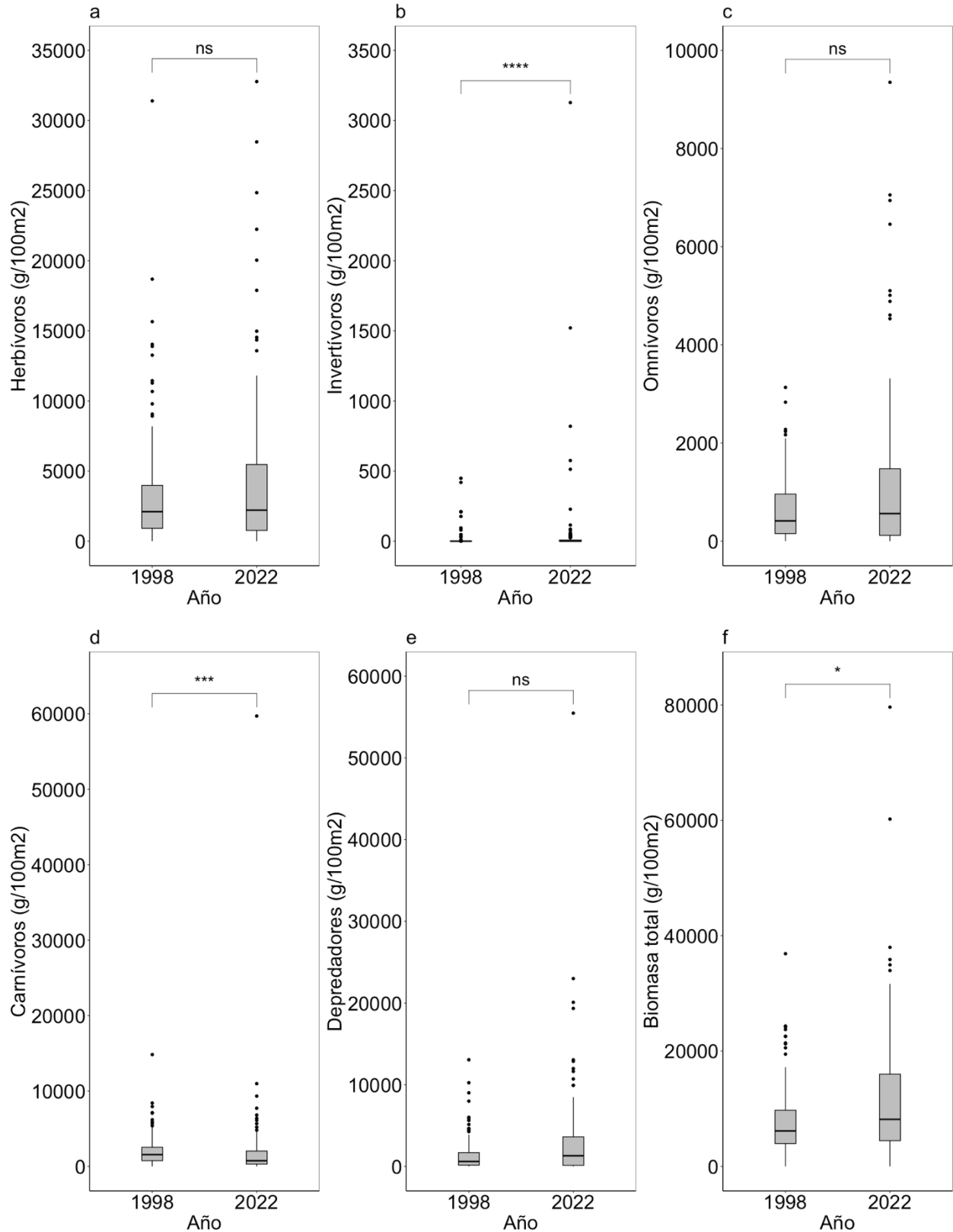


Figura 44. Comparación de la biomasa de diferentes grupos tróficos de peces en función de los años de monitoreo.

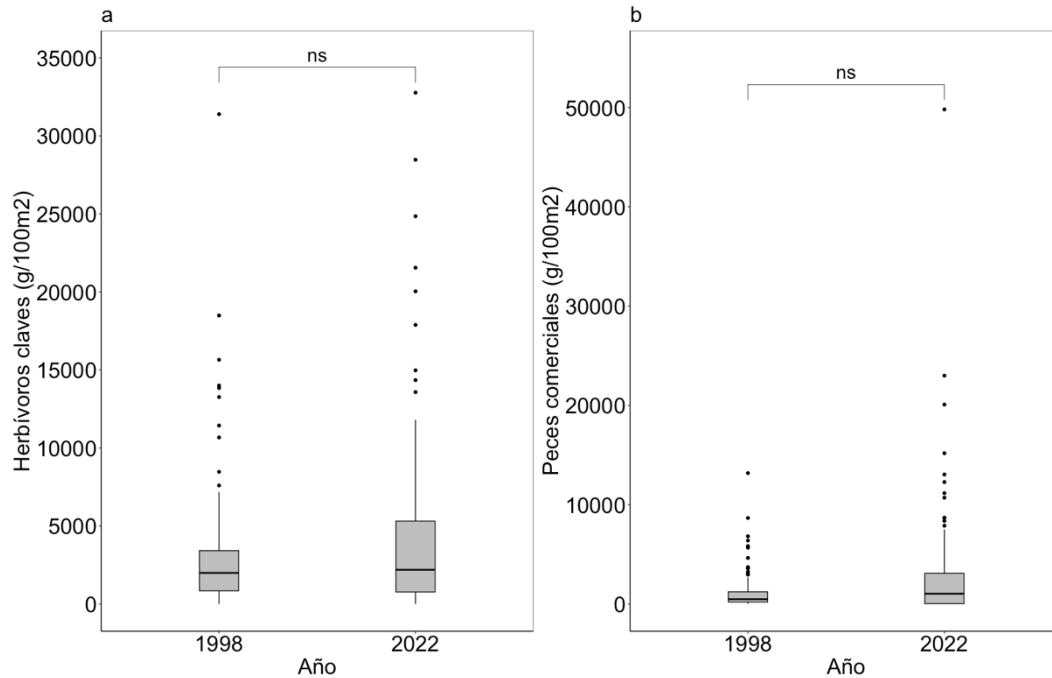


Figura 45. Comparación de la biomasa de grupos claves de peces (herbívoros considerando únicamente los peces loro y cirujanos, y los peces comerciales, considerando los meros y pargos) en función de los años de monitoreo.

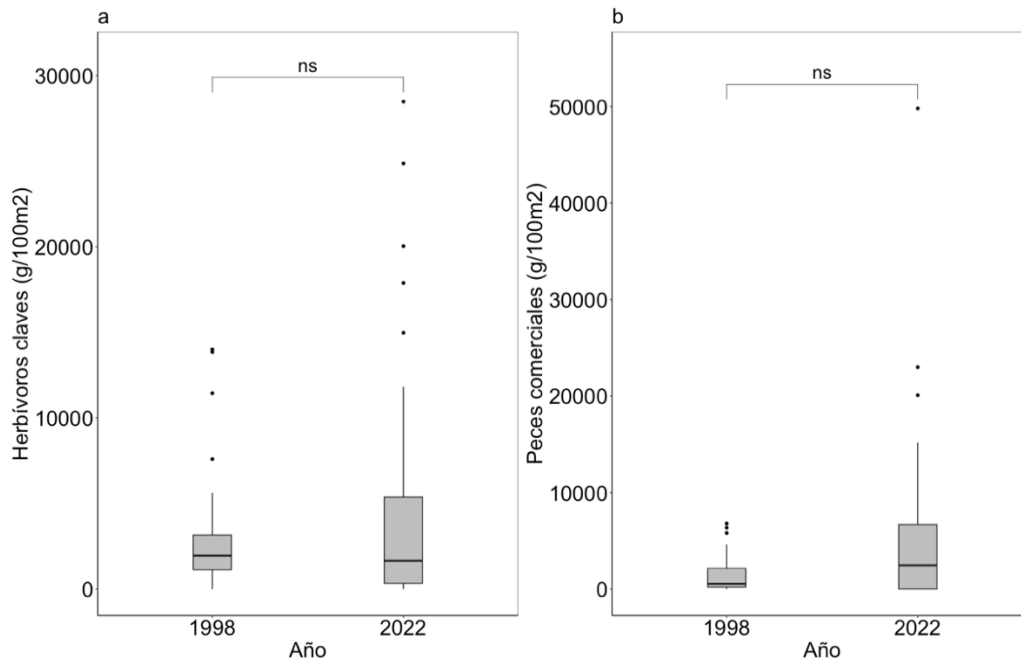


Figura 46. Comparación de la biomasa de grupos claves de peces (herbívoros considerando únicamente los peces loro y cirujanos, y los peces comerciales, considerando los meros y pargos) en función de los años de monitoreo en los sitios dentro de la zona núcleo norte.

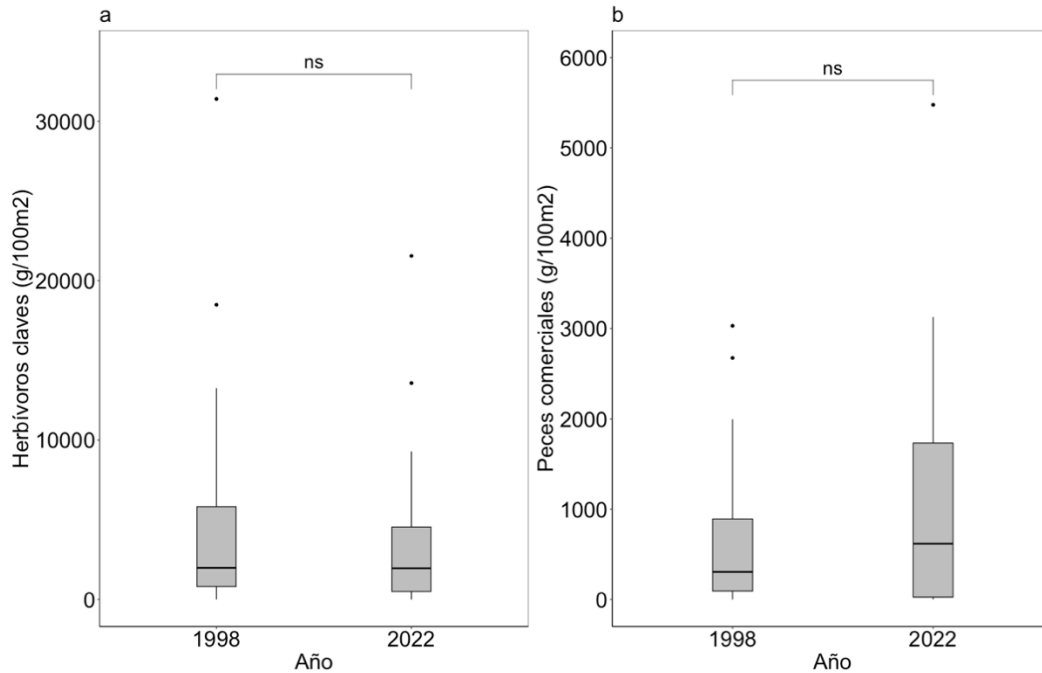


Figura 47. Comparación de la biomasa de grupos claves de peces (herbívoros considerando únicamente los peces loro y cirujanos, y los peces comerciales, considerando los meros y pargos) en función de los años de monitoreo en los sitios dentro de la zona núcleo sur.

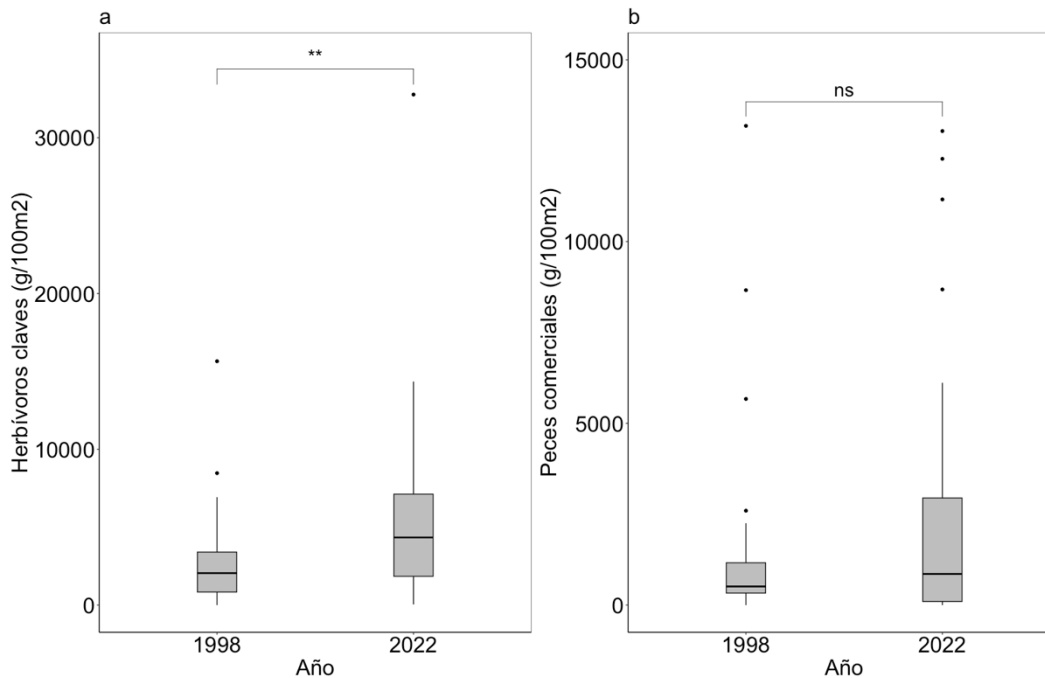


Figura 48. Comparación de la biomasa de grupos claves de peces (herbívoros considerando únicamente los peces loro y cirujanos, y los peces comerciales, considerando los meros y pargos) en función de los años de monitoreo en los sitios dentro de la zona de amortiguamiento.

Finalmente, al considerar el promedio de las biomazas totales, se observa un aumento entre 1998 y 2022 de 3.65 kg/100 m² (**Figura 49**), con un aumento de 12% en el porcentaje de peces comerciales (meros y pargos), reflejado anteriormente por un aumento significativo en el grupo trófico de los carnívoros (**Figura 44d**).

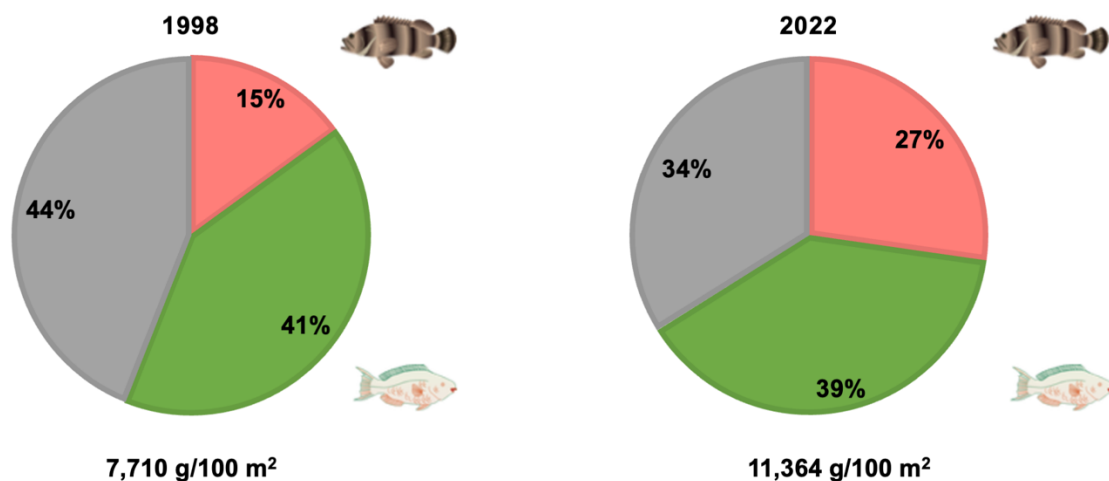


Figura 49. Comparación de la biomasa total promedio y el porcentaje de representación de grupos claves de peces (herbívoros considerando únicamente los peces loro y cirujanos, y los peces comerciales, considerando los meros y pargos) entre los datos obtenidos en 1998 y 2022.

Cambios de hábitats

El análisis de cambio de hábitats o tipos de fondo del T1 al T2, se realizó contrastando los patrones espaciales de los hábitats entre ambos mapas. Cabe destacar que, como se mencionó anteriormente, la C9 que equivale a praderas de macroalgas del T1, no se identificó en la verificación en campo, y los cambios temporales de esta clase fueron en su mayoría positivos hacia clases con mayor importancia ecológica por su cobertura de coral.

De la misma manera las clases C3 y C4 del T1 no tienen una comparación directa, aunque existe una similitud espacial y ecológica entre estos hábitats en los 2 tiempos, los hábitats del T2 son versiones degradadas de los hábitats del T1, con dominancia de

macroalgas y disminución de cobertura coralina. Por esta razón estas clases del T2 fueron recodificadas como C33 y C44 para que el análisis las reconociera como clases diferentes entre los dos tiempos. Los valores resultantes del análisis de cambio de hábitats se categorizaron en 3 niveles: positivo, neutro y negativo (**Figura 50**).

La mayor parte (59.94%) de la plataforma arrecifal sufrió cambios negativos, asociados a la pérdida de cobertura coralina y al aumento en macroalgas. Una tercera parte de la plataforma (31.09%), asociada a principalmente a arenales y camas de cascajo con cobertura escasa, no tuvo cambios, y solo un 8.96% de la plataforma tuvo cambios positivos, principalmente asociados a la disminución de la cobertura de macroalgas sobre estructuras coralinas.

7.5. Análisis Espacial de Escenarios de Priorización

Priorización de Hábitats

La priorización de hábitats aplicada al mapa temático de tipos de hábitats de T2, produjo un nuevo mapa (**Figura 51**) en donde se aprecia la distribución de hábitats de alta prioridad en la zona del arrecife posterior a todo lo largo del borde interior de sotavento y de los hábitats definidos con buena cobertura coralina y pastos densos (C1, C8, y C10). Los valores medios (**Figura 51**) se asocian a la parte somera de la plataforma en donde se desarrolla el sistema de parches coralinos reticulados y la parte profunda del exterior de la plataforma a sotavento y barlovento (C2, C33, C4, C44, y C7). Mientras que los valores más bajos de priorización (**Figura 51**) corresponden a los fondos con poca complejidad de hábitat (C6 y C11, representando arenales, camas de cascajo, estructuras coralinas en degradación o dominadas por algas, etc.).

Complejidad de Parches

A partir del mapa de hábitats o tipos de fondo del T2, se generó otro mapa con los resultados del cálculo de la complejidad de cada parche de cada hábitat, el cual se

categorizó en 3 niveles: alto, medio y bajo (**Figura 52**). La mayor complejidad corresponde a los parches coralinos reticulados en la parte central de la laguna, y en general a las estructuras con coberturas de coral desde razonable a altas. La complejidad media corresponde a estructuras arrecifales dominadas por macroalgas y octocorales, y la complejidad baja corresponde a las zonas de arenas y camas de cascajo con poca cobertura biológica a diferentes profundidades.

Conectividad de Hábitats

A partir del mapa de hábitats del T2 transformado a formato vectorial de polígonos, se generó un mapa de conectividad entre parches del mismo hábitat. Los valores obtenidos a través del cálculo de la distancia euclidiana entre los centroides de cada polígono se categorizaron en tres niveles (**Figura 53**). La zona de alta conectividad abarca la mayoría de la zona reticulada y parches coralinos de toda la plataforma. La zona de conectividad media corresponde a la zona más somera de la plataforma que abarca el arrecife posterior y los parches reticulados de la laguna cercanos al arrecife posterior y la zona de sotavento.

β -diversidad

A partir del mapa de tipos de fondo del T2, se calculó la β -diversidad, que básicamente consiste en evaluar la tasa de cambio de los hábitats en el espacio, y los valores resultantes mientras más altos sean, implican espacios donde coexisten diferentes hábitats. Los valores obtenidos se categorizaron en una escala de tres niveles. La zona de parches coralinos reticulados de la plataforma, y las estructuras arrecifales de barlovento presentan los valores más altos (**Figura 54**). Se reconoce el patrón de valores medios en los bordes de estas zonas de alta β -diversidad y asociados a las estructuras coralinas de gran tamaño y aisladas en la plataforma (**Figura 54**). Las áreas de menor β -diversidad, una vez más se asocian a los fondos arenosos y camas de cascajo con escasa cobertura (**Figura 54**).

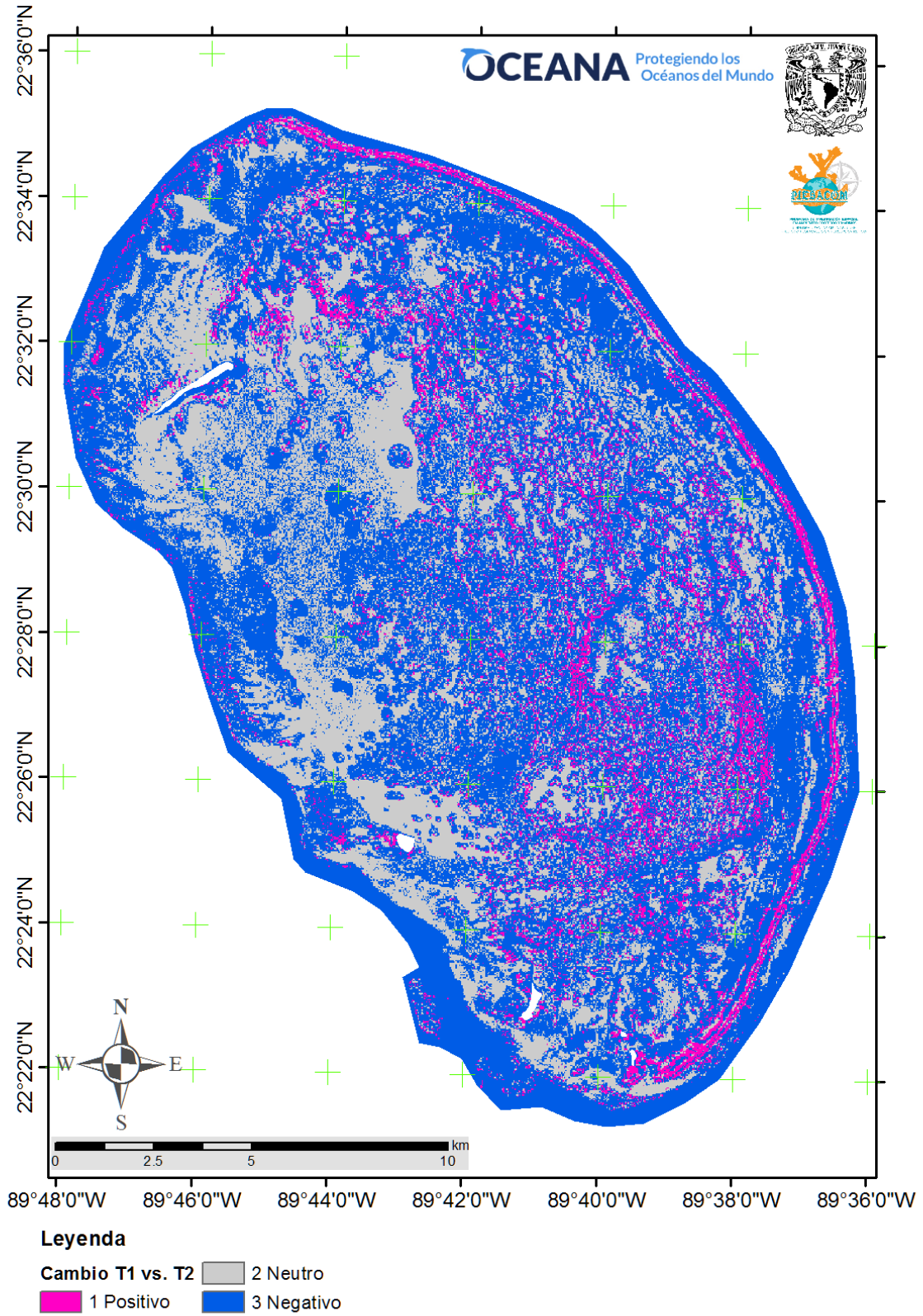


Figura 50. Análisis de cambio entre los mapas de tipos de hábitats en 2000 y 2022.

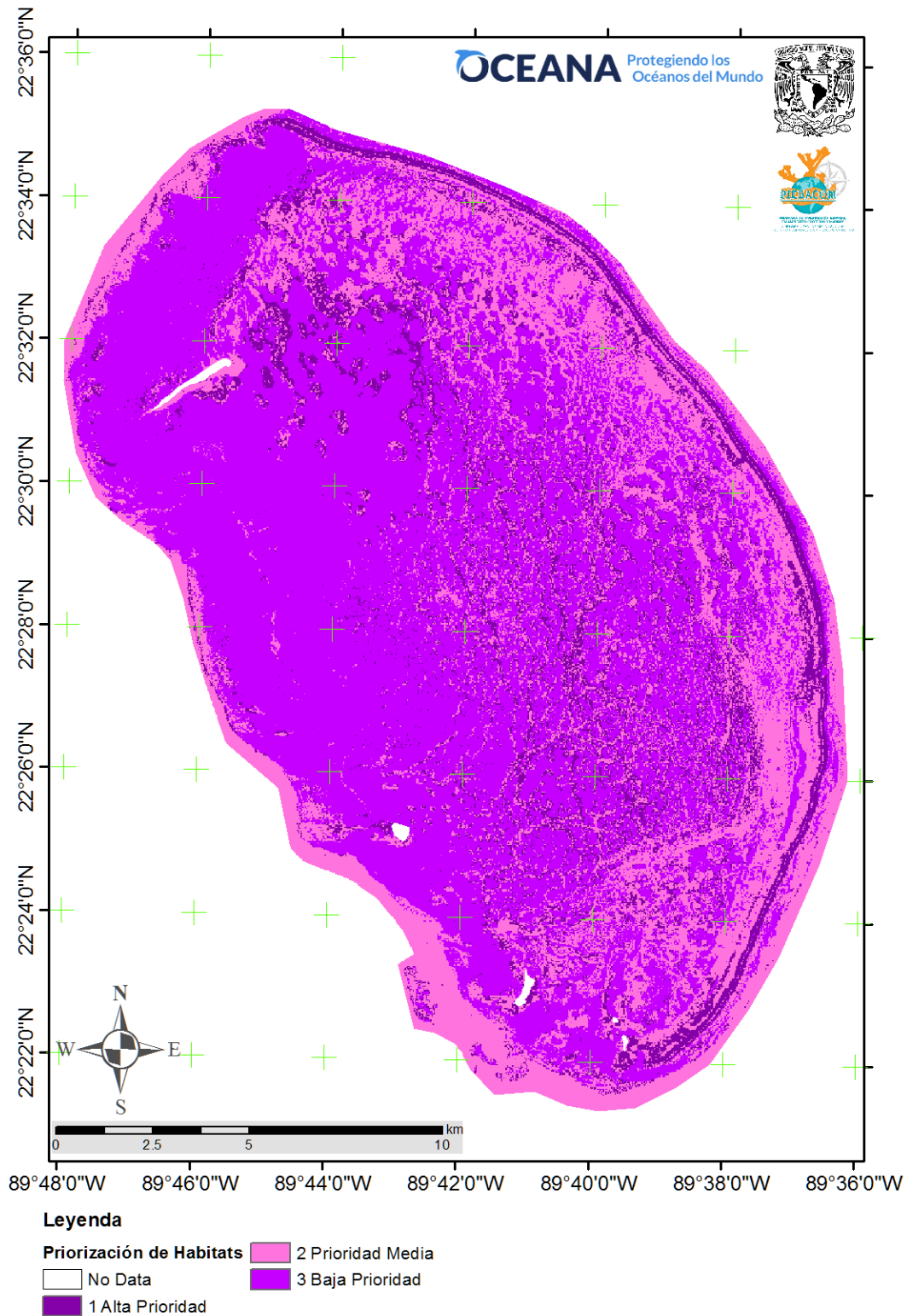
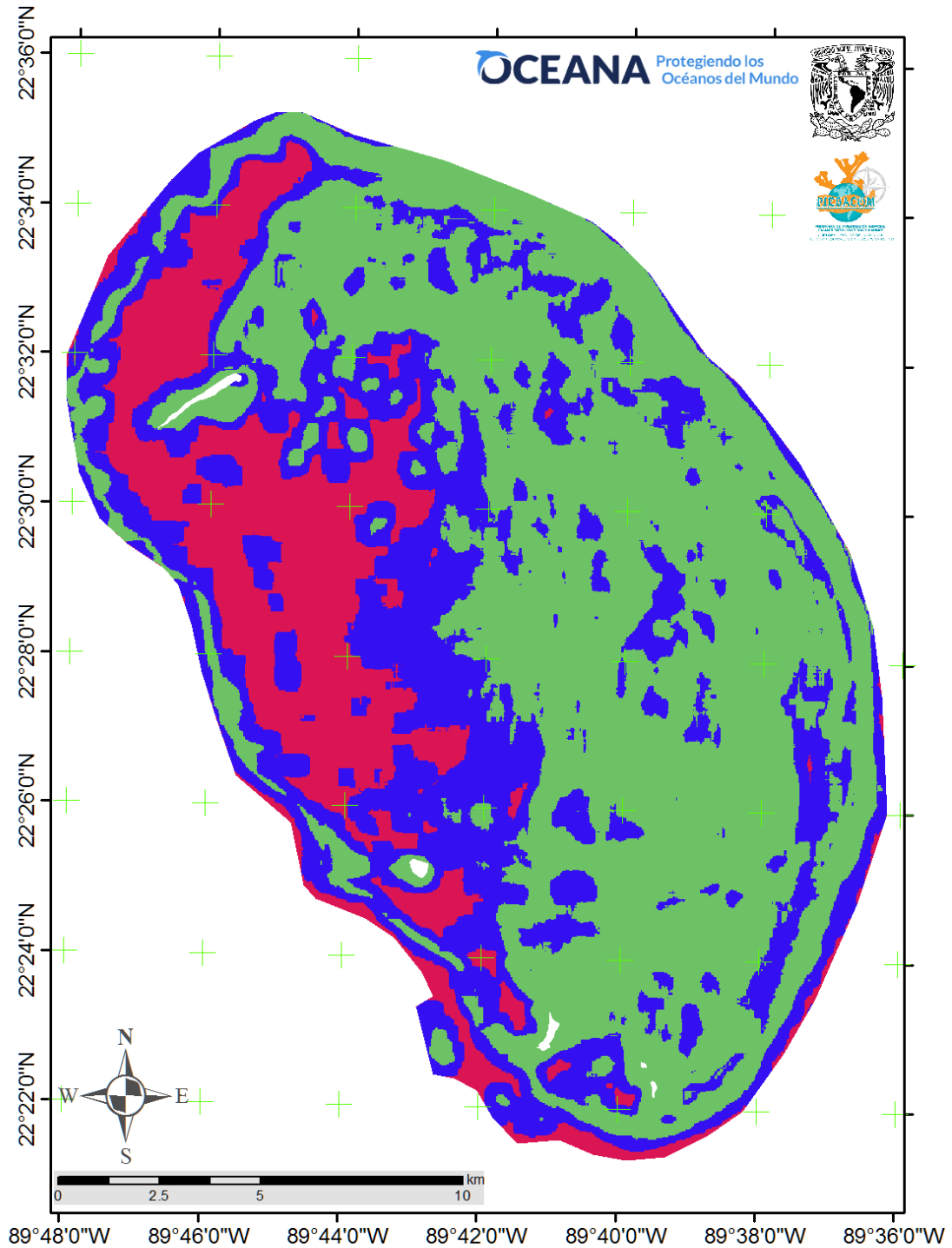


Figura 51. Mapa de priorización de hábitats, basado en el mapa temático de tipos de hábitat del 2022.



Legenda

- | | | |
|----------------|---|---------|
| Betadiversidad | ■ | 2 Media |
| | ■ | 1 Alta |
| | ■ | 3 Baja |

Figura 54. Mapa del cálculo de β -diversidad derivado del mapa temático de tipo de hábitats del 2022.

Intensidad de Usos

Derivado del ejercicio de consulta participativa se generaron cuatro mapas de intensidad de diferentes usos presentes en la plataforma arrecifal del PNAA (**Figura 55**). A partir de estos mapas se calculó un mapa de intensidad ponderada de los 4 usos: pesca furtiva, pesca comercial, pesca deportiva y turismo/visitación. Las áreas con mayor intensidad de los diferentes usos son en el norte, las zonas a barlovento y sotavento de Isla desterrada, en la parte central el macizo de parches coralinos reticulados, al suroeste de la plataforma, las inmediaciones de Isla Muertos, y al sureste un corredor entre el canal de acceso a Isla Pérez y el canal de anegados (**Figura 56**).

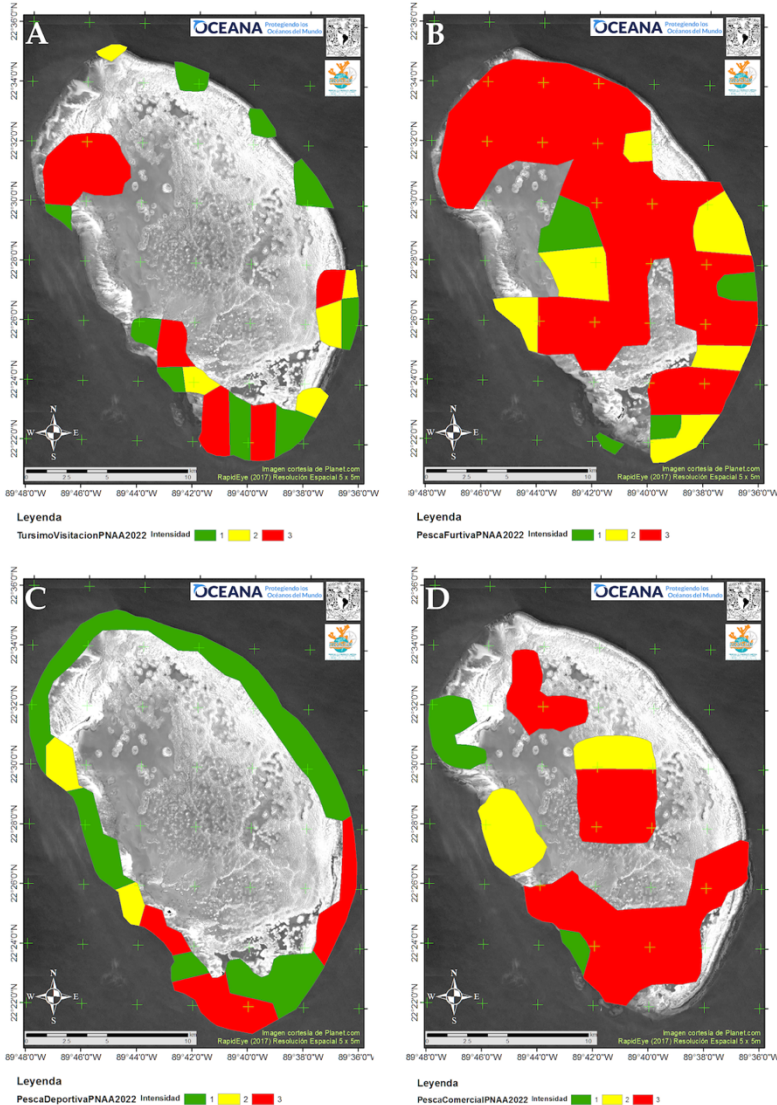


Figura 55. Mapas de intensidad de los usos en la plataforma arrecifal de Arrecife Alacranes: A) turismo/visitación; B) pesca furtiva; C) pesca deportiva; D) pesca comercial. Integrando las opiniones y conocimiento experto de actores y usuarios claves del PNAA.

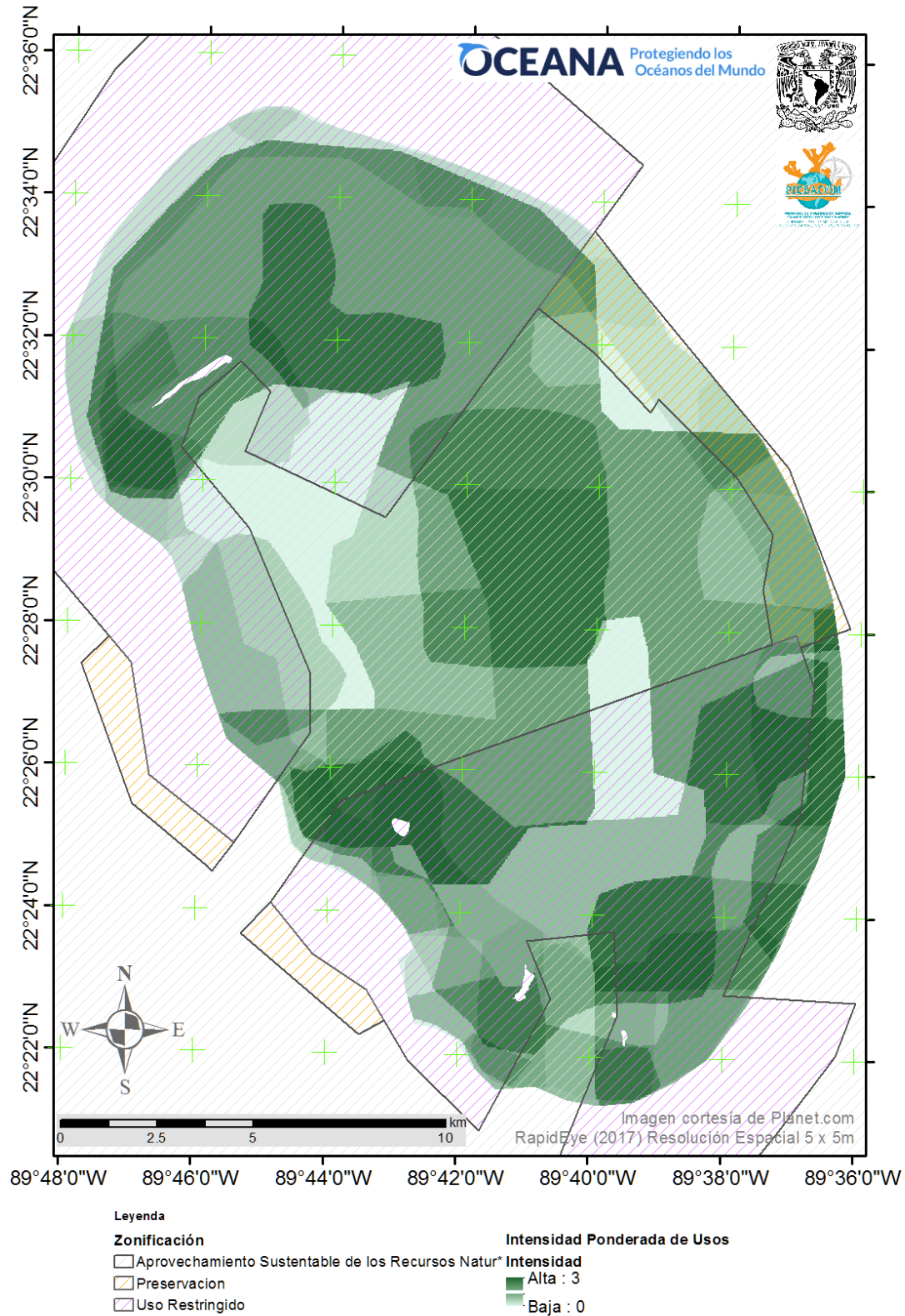


Figura 56. Mapa de intensidad ponderada de usos en la plataforma arrecifal del PNA, calculado a partir de los 4 mapas de uso de turismo/visitación, pesca furtiva, pesca deportiva y pesca comercial.

Escenarios de Priorización

Se proponen tres escenarios de priorización: escenario A, escenario B y escenario C. El escenario A prioriza el ambiente. En este escenario el mapa refleja las zonas de alta prioridad a lo largo de la cresta arrecifal y el arrecife posterior, y a todo lo largo del sistema de parches coralinos reticulados (**Figura 57**). Las zonas de prioridad media generan un buffer o “suavizamiento” alrededor de las zonas de alta prioridad, e incluyen la parte profunda del exterior de la plataforma (**Figura 57**). Mientras que las zonas de prioridad baja se asocian a los hábitats con menor complejidad e importancia biológica como arenales, camas de cascajo, y estructuras coralinas en degradación (**Figura 57**).

El escenario B, prioriza tanto el ambiente como los usos poco intensos. En este escenario se forma un gran hotspot de prioridad alta y media en la parte central del polígono sur de la zona núcleo del PNAA, otro en la parte norte de la zona de aprovechamiento, subzona de preservación, sobre el borde de sotavento de la plataforma arrecifal, y pequeños hotspots en estructuras coralinas aisladas en el polígono norte de la zona núcleo (**Figura 58**). Aunque la actual zona de aprovechamiento sustentable presenta una alta proporción de áreas de importancia media y alta asociadas al sistema de parches coralinos reticulados (**Figura 58**).

El escenario C, prioriza el ambiente y los usos más intensos. En este escenario, correspondiente a la aplicación tradicional de la priorización sistemática de áreas de conservación, de manera simplificada se puede decir que pone en relieve las mayores intensidades y frecuencias de usos en los hábitats más importantes, lo cual se aprecia en la generación de un gran hotspot en la parte central del sistema de parches coralinos reticulados, la cual corresponde a la zona de aprovechamiento sustentable, y expande los hotspots en ambos polígonos (norte y sur) de la zona núcleo (**Figura 59**).

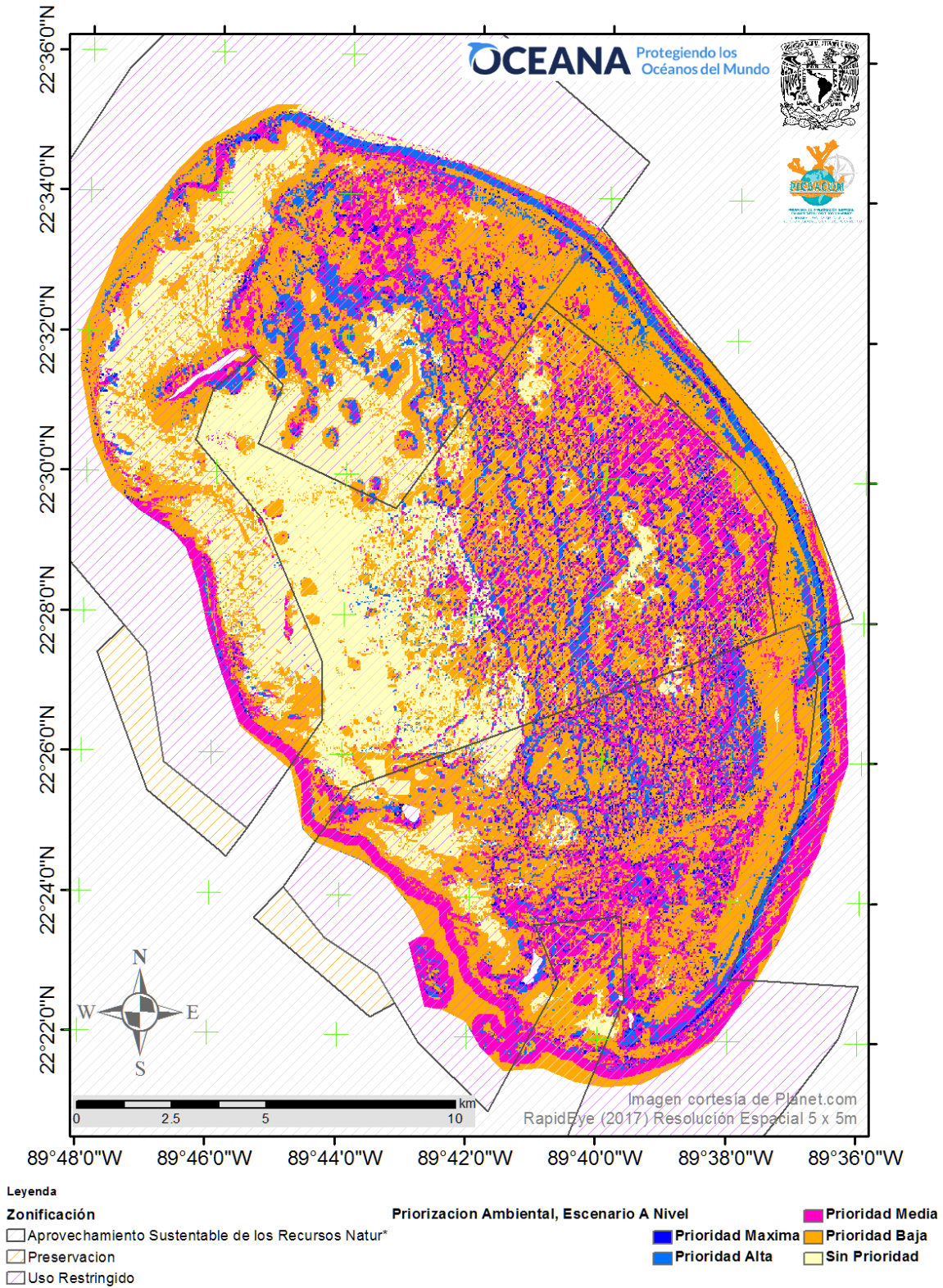


Figura 57. Escenario A de priorización de áreas de conservación, sin contemplar los usos ni sus intensidades.

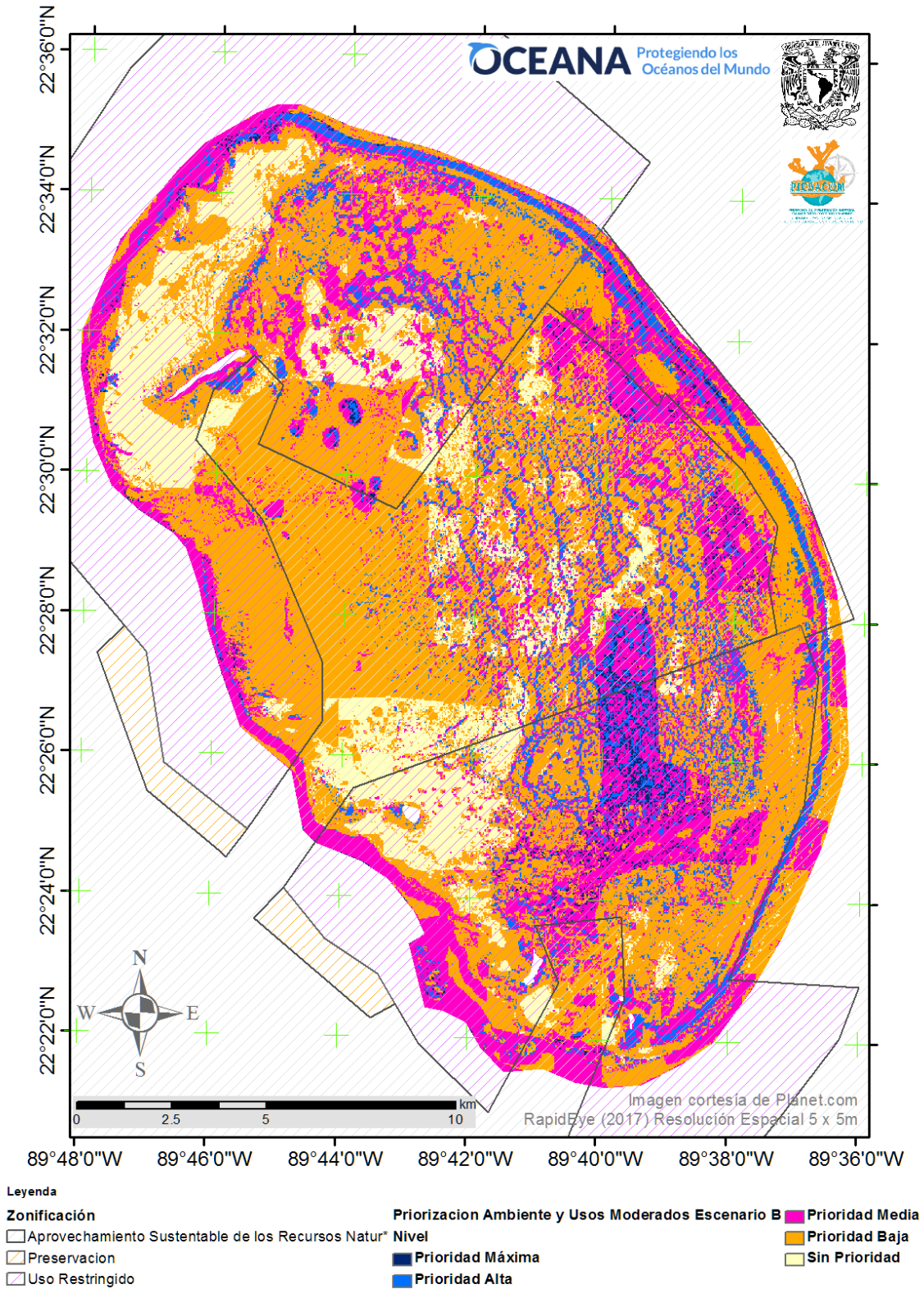


Figura 58. Escenario B de priorización de áreas de conservación, dando realce a los niveles bajos de presencias y e intensidades de usos.

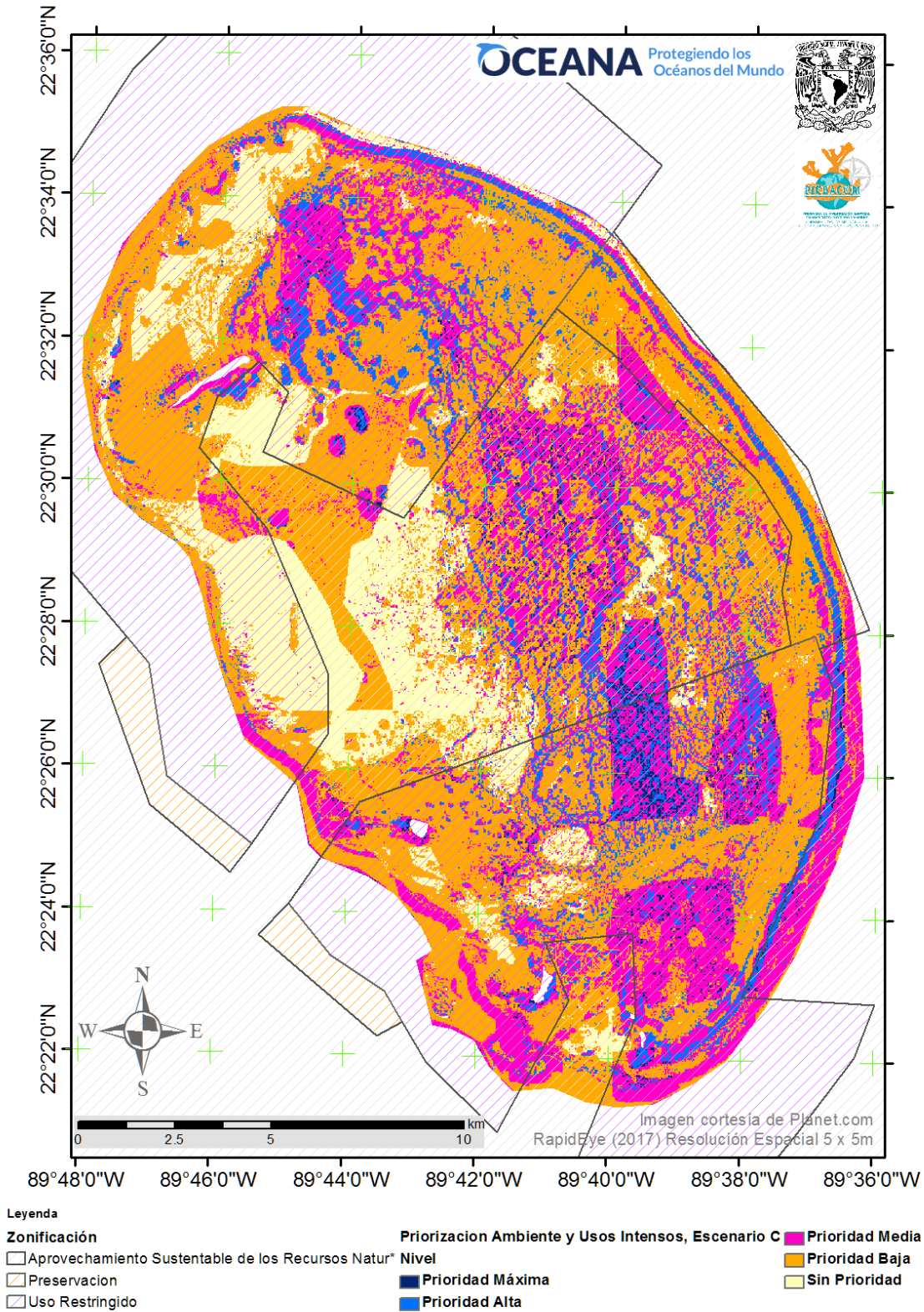


Figura 59. Escenario C de priorización de áreas de conservación, este es el escenario tradicional, que enfatiza los niveles altos de presencias y e intensidades de usos.

La plataforma arrecifal del PNAA es el área de interés de este reporte, y está dividida actualmente en tres zonas: zona núcleo, zona de preservación y zona de aprovechamiento. Debido a la disposición espacial de los polígonos de zonificación y el recorte del área de interés de la plataforma, se observan 6 polígonos diferentes: zona núcleo norte, zona núcleo sur, zonas de aprovechamiento centro, sur y sureste, y la zona de preservación a sotavento (**Figura 60**).

Para cada polígono se realizó un cálculo del porcentaje de área de cada categoría de priorización espacial: prioridad máxima, alta, media, baja, y sin prioridad, de acuerdo con cada escenario, para contextualizar la propiedad o congruencia de la zonificación actual del PNAA con las áreas prioritarias que se obtuvieron. Las categorías de interés para este ejercicio son las de máxima y alta prioridad, cuyos porcentajes se sumaron (**Tabla 15**).

Para establecer si existe una diferencia significativa entre los valores de porcentaje de la suma de las dos categorías con mayor prioridad (máxima y alta prioridad) en los 6 polígonos bajo cada escenario, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Kruskal-Wallis, las cuales no detectaron diferencias significativas (valores $p = 0.86$ y 0.7 respectivamente, a 95% de nivel de confianza) entre las proporciones de área de estas categorías de priorización entre los diferentes escenarios.

En términos generales, no solo la proporción de área, sino la distribución espacial de las categorías de alta prioridad es muy similar entre los tres escenarios. Los cambios principales entre distribuciones espaciales de categorías de prioridad se dan entre las áreas de prioridad media y baja.

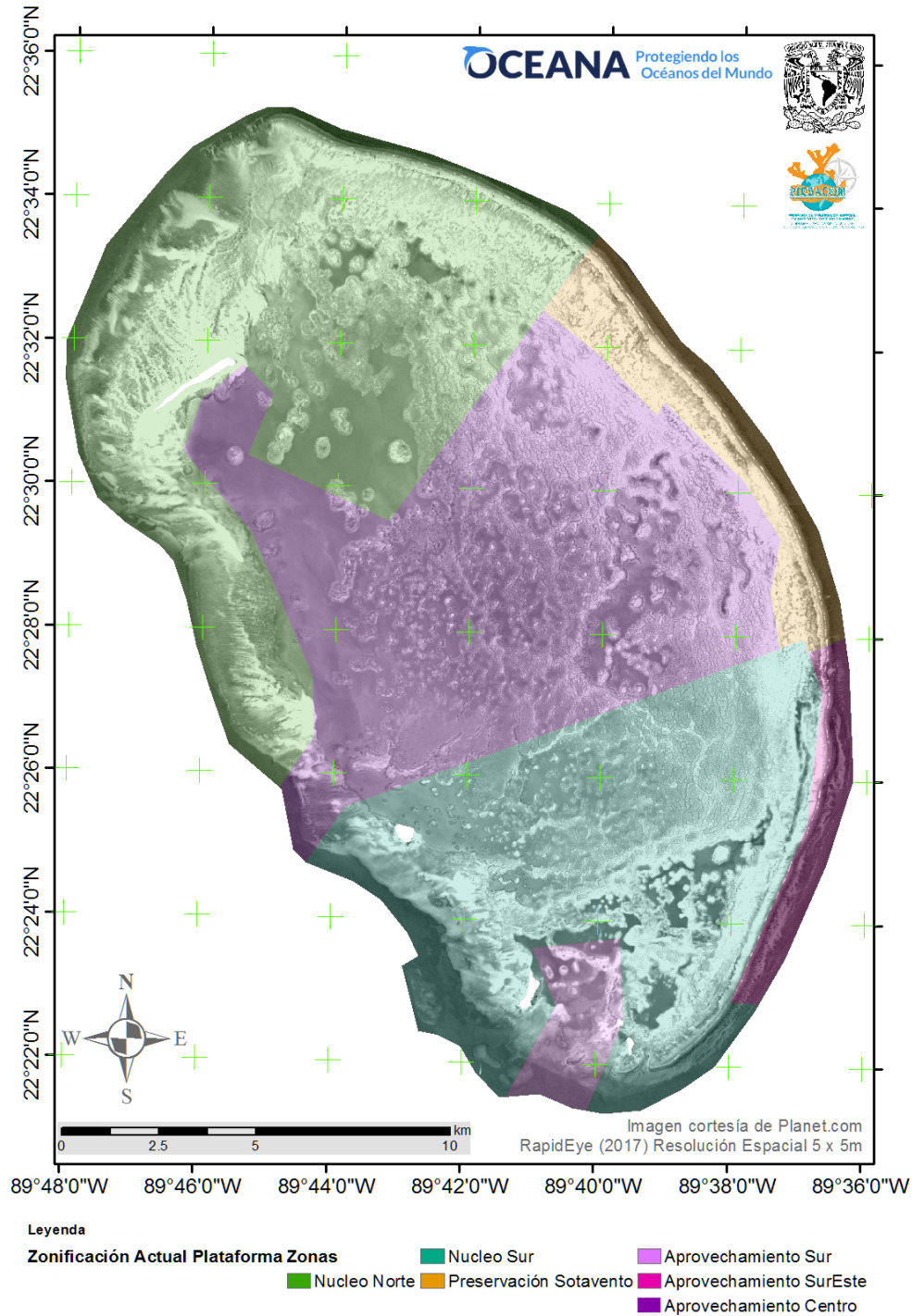


Figura 60. Representación de las diferentes zonas del polígono de zonificación del PNA, restringidas a la plataforma arrecifal, que es el área de interés de este reporte. En tonos verdes están los polígonos de las zonas núcleo norte y sur; en tonos morados los polígonos correspondientes a la zona de amortiguamiento de la subzona de aprovechamiento sustentable de recursos naturales. Y en tono amarillo la subzona de preservación de la zona de amortiguamiento.

Tabla 15. Comparación de área priorizada según los escenarios A, B y C. Las columnas de categorías de prioridad expresan valores en porcentaje de área que ocupan en cada una de las zonas del polígono del PNAA, sobre la plataforma arrecifal.

Escenario A No Uso	Prioridad Máxima	Prioridad Alta	Suma Prior Max+Alta	Prioridad Media	Prioridad Baja	Sin Prioridad
Z. Amort. Sur	3.19	4.24	7.43	36.16	50.94	5.48
Z. Amort. Sotav	3.45	16.55	20.00	12.75	67.07	0.18
Z. Núcleo N	2.43	7.93	10.36	15.13	44.64	29.80
Z. Núcleo S	6.19	7.44	13.63	28.3	51.41	6.73
Z. Aprov. SE	3.98	16.63	20.61	52.44	26.95	NA
Z. Aprov. Cent.	4.67	5.67	10.34	20.71	38.5	30.39
Escenario B Uso Ligero						
Z. Amort. Sur	0.77	6.20	6.97	38.84	50.6	3.89
Z. Amort. Sotav	1.94	17.86	19.80	35.45	44.4	0.35
Z. Núcleo N	0.68	7.12	7.80	20.94	56.71	14.55
Z. Núcleo S	1.41	12.46	13.90	18.07	58.03	10.00
Z. Aprov. SE	0.01	14.58	14.59	27.43	57.02	0.06
Z. Aprov. Cent.	0.99	8.73	9.70	21.04	58.69	10.57
Escenario C Uso Intenso						
Z. Amort. Sur	0.58	6.58	7.16	30.28	54.31	8.25
Z. Amort. Sotav	0.36	15.24	15.60	17.33	65.43	0.64
Z. Núcleo N	0.56	9.33	9.89	15.94	56.84	17.33
Z. Núcleo S	1.41	13.52	14.93	18.97	50.54	1.55
Z. Aprov. SE	3.06	17.38	20.44	42.41	37.15	NA
Z. Aprov. Cent.	2.28	8.36	10.64	23.89	46.7	18.77

Congruencia Espacial

De manera visual se evaluó la presencia de las categorías de priorización más altas dentro de cada polígono. En general se encontró que las clases de alta prioridad tienen una representación espacial balanceada, tanto la zona núcleo norte como en la sur. Esta cualidad les confiere validez actual a estos dos polígonos, sin embargo, las categorías de alta prioridad presentan una distribución generalizada en toda la plataforma arrecifal.

Esta distribución generalizada, hace énfasis en la necesidad de la revisión de su distribución en los polígonos de las subzonas de preservación y de aprovechamiento sustentable de recursos naturales.

Con base en este análisis, se identificaron tres áreas de la plataforma en las cuales existen extensiones importantes de categorías de prioridad máxima y prioridad alta, que no se encuentran incorporados en la zona núcleo. La primera corresponde a la zona de amortiguamiento, en la subzona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Zona de Aprovechamiento Centro), que presenta estructuras con muy alta cobertura coralina de especies constructoras arrecifales, al sureste de Isla Desterrada (**Figura 61**).

La segunda, es un área también incluida en esta zona de aprovechamiento centro, y está relacionada con el sistema de parches coralinos reticulados, que presenta alta cobertura coralina y alta complejidad de hábitat (**Figura 62**). La tercera área es la parte de la cresta, arrecife posterior y arrecife frontal, que actualmente está integrado en la zona de aprovechamiento (zona de aprovechamiento sureste), y que es una zona de alta complejidad de hábitat, alta cobertura coralina, alta biomasa de peces (**Figura 63**), que tiene sitios icónicos de desarrollo arrecifal como la canal de anegados.

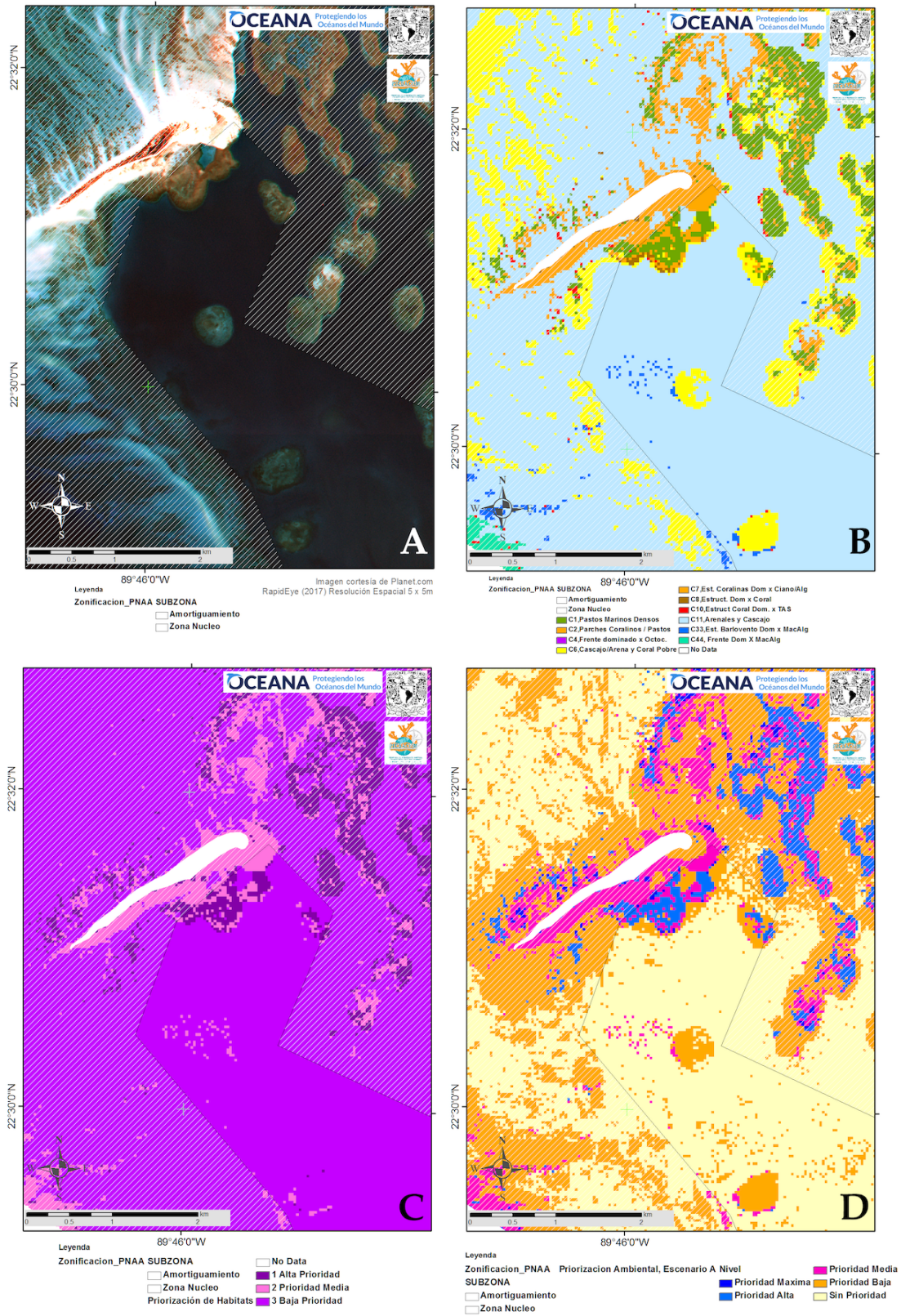


Figura 61. La subzona de aprovechamiento centro dentro de la zona de amortiguamiento con áreas de muy alta prioridad fuera de la zona núcleo norte.

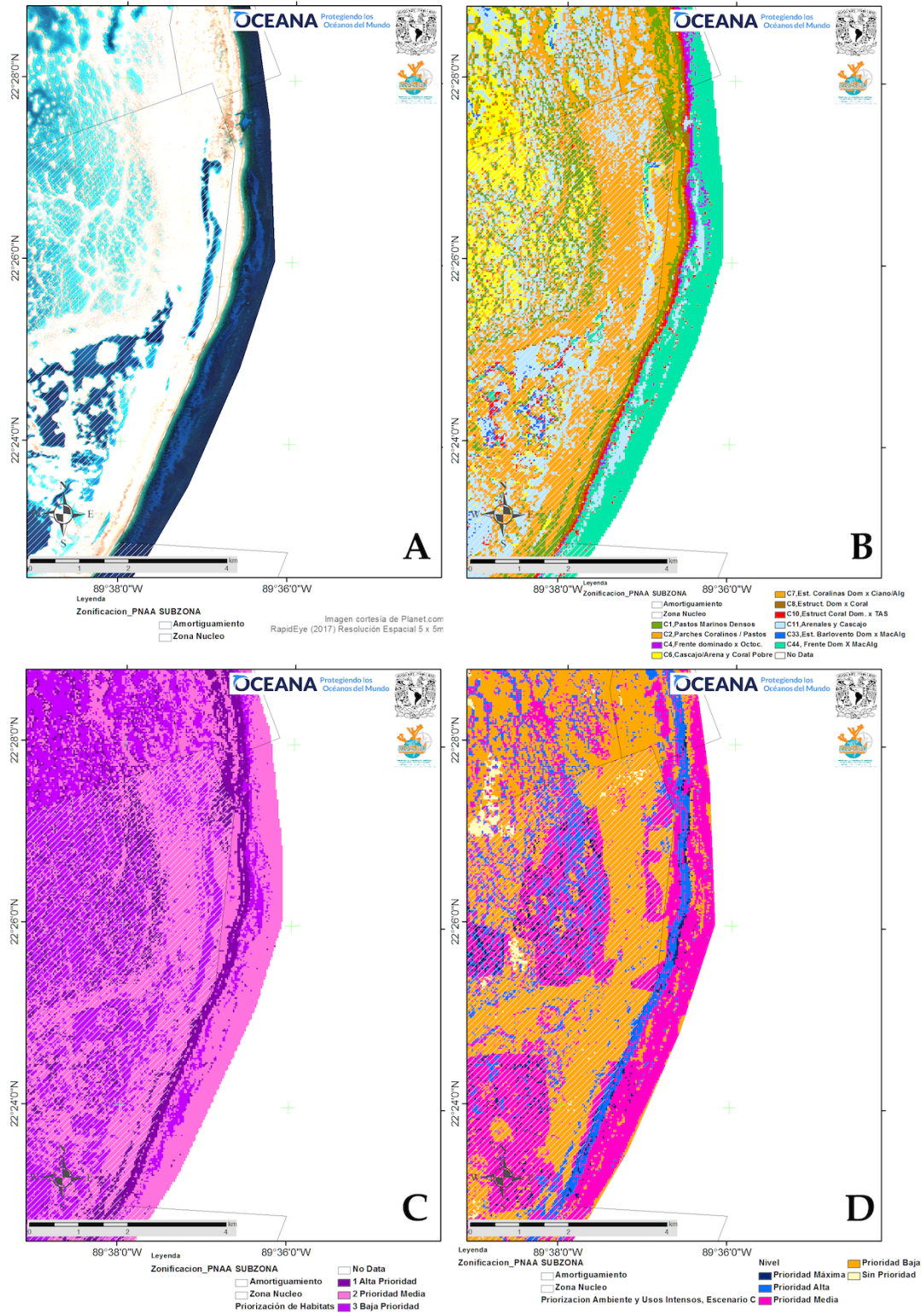


Figura 62. La subzona de aprovechamiento sureste dentro de la zona de amortiguamiento presenta áreas de muy alta prioridad fuera de la zona núcleo sur.

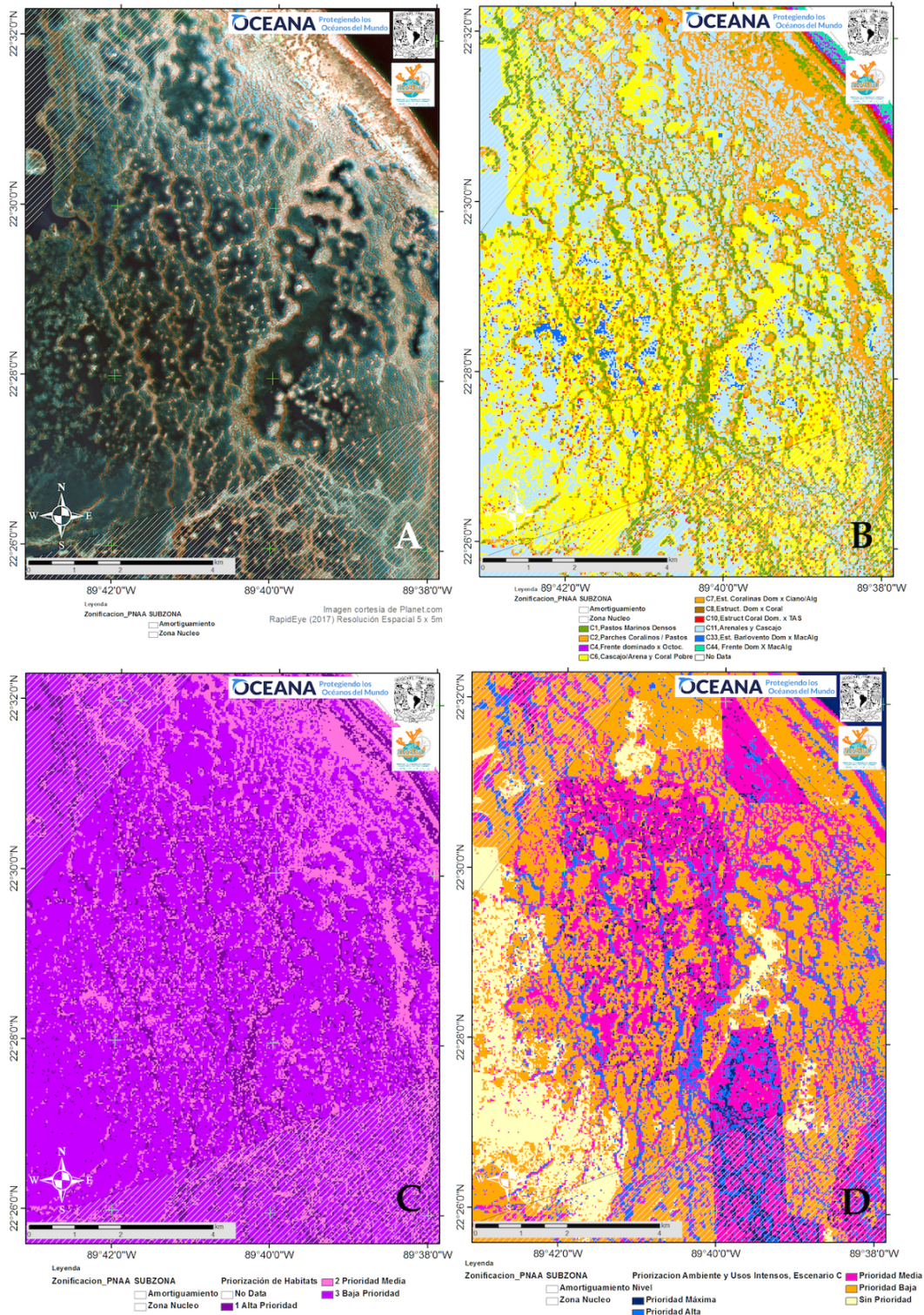


Figura 63. La subzona de aprovechamiento centro dentro de la zona de amortiguamiento presenta áreas de muy alta prioridad asociadas al sistema de parches coralinos reticulados.

8. DISCUSIÓN

La evaluación ecológica realizada en 111 sitios del Parque Nacional Arrecife Alacranes ha permitido actualizar los hábitats marinos, así como la diversidad (riqueza y balance) de corales y peces, evaluar el estado de salud de los sitios arrecifales y los cambios temporales y principalmente priorizar espacialmente las necesidades de manejo.

Para los corales escleractíneos se encontraron 30 especies, en comparación con 27 especies mencionadas en el plan de manejo (CONANP, 2006) y 22 especies registradas en la campaña OCEANA 2021 (OCEANA, 2022). Uniendo todas las especies de este listado se llega a un total de 37 corales escleractíneos (**Tabla A1** en Anexos). Para los peces se observaron 116 especies de las 197 especies registradas en el plan de manejo (CONANP, 2006). Uniendo todas las especies de este listado se llega a un total de 222 especies de peces, entre las cuales dos especies invasoras *Neopomacentrus cyanomos* y *Pterois spp.* (**Tabla A2** en Anexos). Estos resultados preliminares suman tres especies de corales duros y doce especies de peces que no habían sido registradas formalmente antes en el plan de manejo, la campaña del CINVESTAV 1998 y la campaña de OCEANA 2021 (**Tabla A3** en Anexos).

En términos de la estructura del ensamblaje de especies coralinas en los sitios evaluados en el PNAA, es muy alentador, y poco común en la región (Randazzo-Eisemann et al., 2021) que el 77% de las colonias registradas en los diferentes sitios pertenezcan a la estrategia de vida estrés-tolerante, y que el 63% del total de las colonias coralinas sean de especies constructoras de los géneros *Acropora*, *Orbicella* y *Montastraea*. En términos de condición coralina, el 15% del total de colonias coralinas registradas presentan algún tipo de lesión o padecimiento y son mayormente parte de la estrategia estrés-tolerante.

La cobertura coralina promedio de los sitios muestreados en la plataforma del PNAA, es de 11.76%, lo cual lo categoriza como cobertura regular o razonable en la escala del índice de salud arrecifal del Healthy Reefs (2022) y es comparable con el promedio de

cobertura coralina del Caribe Mexicano reportado para el 2021 de 12%. Sin embargo, a diferencia de los sitios evaluados por Healthy Reefs, los cuales están principalmente enfocados en sitios con desarrollo arrecifal, el diseño muestral del presente estudio abarca todos los tipos de ambientes presentes en las diferentes zonas ecológicas de la plataforma arrecifal, y hace esta que esta comparación no sea del todo directa. Entre los sitios muestreados hay 20 con coberturas superiores al 20% (con cobertura promedio de 31.6%) y otros 27 con coberturas entre 10% y 20% (cobertura promedio de 13.85%) lo cual indica que más del 40% de las estaciones tienen una cobertura regular, buena o muy buena, comparados con el 25% de sitios evaluados en el arrecife mesoamericano en las mismas categorías (Healthy Reefs, 2022).

La condición que afecta de manera más frecuente a las colonias de coral es la mortalidad antigua, lo cual significa que estuvieron expuestas a algún tipo de mortalidad de tejido (ya sea enfermedades coralinas o blanqueamiento) pero las lesiones no están activas en el presente. Esto es un indicador de degradación porque alrededor de un 9%, de estas colonias registradas presentan una mortalidad antigua mayor al 40% de su superficie, y este espacio disponible, muchas veces es ocupado por macroalgas, algas césped y cianobacterias, los cuales a la larga comprometen la condición de cada una de estas colonias, ya sea porque impiden la recuperación del tejido vivo de la colonia o ya sea porque inhiben el asentamiento de nuevos reclutas coralinos en esa superficie.

Adicionalmente, se registró un 4% total las colonias afectadas en alguna medida por blanqueamiento coralino: 2% estaban blanqueadas y 2% estaban pálidas. Esta proporción de colonias afectadas no constituye una bandera roja en sí misma, pero nos da un contexto de múltiples estresores al que se ve expuesto el PNAA de manera crónica, interactuando con el estrés térmico. Asimismo, las colonias coralinas que presentaron lesiones por enfermedades representan un 0.81% del total de las colonias registradas durante los muestreos, siendo las enfermedades más frecuentes la banda amarilla, la banda negra (en su variedad de línea delgada) y los puntos oscuros. Esta proporción de incidencia de enfermedades coralinas es bastante baja cuando se compara con arrecifes

en estado crítico como Akumal, el cual presentó en promedio un 6.9% de colonias con lesiones por enfermedades entre los años de 1999 y 2021 (Randazzo et al., 2022).

No obstante, la presencia de enfermedades representa una bandera roja adicional, ya que uno de los paradigmas de las fortalezas del Arrecife Alacranes es su aislamiento geográfico, por su distancia a la costa, y aún así se encontraron enfermedades. Efectivamente, la presencia de estas enfermedades es un indicador de contaminación antropogénica, particularmente de un incremento en los nutrientes en el agua, y de la presencia de bacterias y virus (Bruno et al., 2003; Fabricius 2005; Voss & Richardson 2006), que, en conjunto con la alta cobertura de algas en algunos sitios, realza la necesidad de un manejo costero y de cuencas hidrológicas integral en la Península de Yucatán, problema que ya se ha señalado en arrecifes del Caribe (Harvell et al., 2007), puesto que estos contaminantes y nutrientes no se generan en suficiente cantidad o concentración dentro del Parque para ocasionar este tipo de problemas.

En conjunto con los datos de mortalidad antigua, los datos de afectación por blanqueamiento y enfermedades comienzan a tener relevancia para la persistencia del arrecife y sus funciones ambientales y ecológicas, debido a que la tasa de crecimiento de los corales es mucho menor a la tasa de pérdida de tejido coralino vivo asociada a enfermedades o blanqueamiento. En términos funcionales esta acumulación de mortalidad antigua disminuye la tasa de acreción del arrecife (calcificación y crecimiento coralino) y puede favorecer desbalances en las tasas de bioerosión, y por lo tanto dar pie a la disminución de la complejidad tridimensional del arrecife y de su función ecológica de refugio (Perry y Alvarez-Filip 2019).

Y esto es particularmente relevante, ya que aproximadamente la mitad de los sitios evaluados en 2022 (64 estaciones de 111) en la plataforma arrecifal del PNAA presentan coberturas de coral menores a 10%, que es el umbral mínimo sugerido por Perry y colaboradores (2013) para mantener el equilibrio entre la erosión y acreción arrecifal, para la región del Caribe. Sin embargo, el ~24% de estas estaciones de muestreo con niveles bajos y pobres de coberturas de coral son sitios asociados a pastos marinos,

camas de cascajo y arena, y otros fondos con baja complejidad estructural. Es decir, no son comparables con el resto de las estaciones representando estructuras coralinas de diferentes tipos. Adicionalmente se puede identificar la señal de degradación ocasionada por este tipo de eventos previos (brotes de enfermedades coralinas y eventos de blanqueamiento masivo) a través del mapa de análisis de cambio en el tiempo (**Figura 49**), en el cual aproximadamente el 60% de la plataforma tuvo cambios negativos hacia clases con características menos deseables (menor cobertura coralina y mayor cobertura algal).

La información generada acerca de los ensamblajes de especies de peces en la plataforma arrecifal del PNAA, son muy alentadores, no solo en términos de diversidad, sino que las biomásas registradas son en general muy altas (~11 kg de biomasa total de peces x 100m²) y más de la mitad de los sitios muestreados corresponden a las categorías de muy bueno en términos de biomasa de herbívoros y peces de importancia comercial. Siendo los sitios con más baja biomasa los que están siendo generalmente asociados a sitios con baja complejidad de hábitat.

Integrando todos los componentes de salud arrecifal, los sitios monitoreados tienen un índice de salud que oscila entre valores críticos y muy buenos (8% de los sitios en cada caso), y el promedio (3.4) para el PNAA en 2022 es regular, así como lo fue en 2021 (OCEANA, 2022). Estos resultados son más altos que en la mayoría de los sitios del Sistema Arrecifal Mesoamericano, donde las dos últimas evaluaciones indican un resultado promedio de mala salud arrecifal con valores del índice de 2.5 y 2.3 para 2018 y 2021 (McField et al., 2020; Healthy Reefs, 2022). El indicador de salud arrecifal con resultados más bajos es el de cobertura coralina, ya que solo 20% de los sitios tienen coberturas en buen y muy buen estado, mientras que, para los demás indicadores, más de 50% de los sitios tienen buen o muy buen estado.

Los 111 sitios monitoreados se clasificaron en nueve hábitats en función de sus dominancias bentónicas. El hábitat con mejores condiciones ecológicas y de salud fue el de estructuras coralinas en buen estado, al tener mayores valores de diversidad de

corales y peces, mayores biomásas de peces y mejores indicadores de salud en general. Mientras que los hábitats con menores índices de diversidad, biomasa asociada e indicadores de salud son los hábitats con pocas estructuras coralinas (planicies de arena y algas, parches de corales y pastos). Estos resultados son coherentes ecológicamente, al existir una relación positiva entre estructura coralinas y por ende complejidad estructural del hábitat, y diversidad y biomásas de peces, lo cual se traduce en mejores condiciones de salud.

Una fortaleza del arrecife Alacranes, es que el ~5% de su plataforma está compuesta por estructuras dominadas por coral (con altas coberturas), y un 17.25% adicional está constituido por parches coralinos con cobertura regular. Otro hábitat crítico presente en la plataforma en gran extensión de área es el dominado por camas densas de pastos marinos (8.56%), dando así una proporción del al menos el 12% de la plataforma aun ocupada por hábitats de alta importancia ecológica y en buena condición, un 31% ocupada por hábitats de importancia media, y un 57% de hábitats de baja importancia ecológica.

Al comparar sitios en diferentes zonas de manejo (zona núcleo norte, zona núcleo sur y zona de amortiguamiento), se obtuvieron algunas diferencias. La zona con más sitios en mejores condiciones de salud arrecifal es la zona núcleo norte, ya que tiene un mayor porcentaje de sitios con buena y muy buena calificación, y un porcentaje menor de sitios con mala y crítica calificación. También se encontraron diferencias significativas entre la zona núcleo norte y otras zonas: menor prevalencia de enfermedades y mortalidad antigua, mayores valores de biomásas de peces depredadores y peces comerciales. Este tipo de resultados requiere un análisis posterior a mayor profundidad, para tratar de encontrar una explicación o correlación con las variables de las que se dispone y variables ambientales que pueden obtenerse vía satélites.

Las zonas núcleo sur y zona de amortiguamiento tienen porcentajes muy similares de sitios con comparable salud arrecifal, a excepción que no se encontraron sitios con una calificación muy buena en la zona núcleo sur. De hecho, en la zona de amortiguamiento,



se encontraron 23% de los sitios con altos valores de salud arrecifal, lo cual influencia positivamente en las biomásas de peces herbívoros y biomasa total, que son significativamente más altos que en la zona núcleo sur. Además, el análisis temporal reveló un aumento significativo de los peces herbívoros en la zona de amortiguamiento entre 1998 y 2022. Por lo que, los resultados de este análisis sugieren que la zona de amortiguamiento posee sitios de relevancia ecológica que valdría la pena considerar en una nueva zonificación.

Al respecto, el análisis de priorización de áreas de conservación coincide con el énfasis en la importancia de la zona de amortiguamiento, y esto se refleja en las áreas identificadas con presencia importante de estructuras arrecifales con prioridad máxima y alta. Coincidentemente en el área cercana a Isla Desterrada se localizan dos sitios evaluados con el índice de salud arrecifal en muy buen estado, con muy alta cobertura coralina (>40), dominado por corales estrés tolerantes, alta biomasa de peces (entre 19 y 24 kg/100m²), y con tasas muy bajas de incidencia de enfermedades y blanqueamiento coralino. Las estaciones mencionadas se han manejado como sitios de esperanza por las características mencionadas y además por el tamaño de las colonias observadas que corresponden a tallas de importancia reproductiva.

De la misma manera, dentro de la parte central de la zona amortiguamiento existe un área extensa de estructuras categorizadas como máxima y alta prioridad, correspondientes al sistema de parches coralinos reticulados, que incluyen estaciones de muestreo con alta biomasa de especies de peces herbívoros, baja incidencia de enfermedades coralinas, alta riqueza de especies coralinas y baja cobertura de macroalgas. La presencia de áreas extensas de categorías prioritarias altas en los diferentes polígonos de zonificación del PNAA podría justificar la propuesta de realizar ajustes a los límites de estos. En el caso del área cercana a Isla Desterrada, este posible ajuste correspondería a desplazar el fondo del “*cul-de-sac*” formado por el polígono, hacia el sur un par de kilómetros, para incluir la estructura coralina de máxima prioridad identificada y proporcionar una distancia de seguridad al borde de la subzona de aprovechamiento sustentable de recursos naturales.

Las otras áreas de alta prioridad identificadas presentan otro tipo de retos por la extensión que involucran. En el caso del sistema de parches coralinos reticulados en el centro de la subzona de aprovechamiento sustentable, podría implicar unir los dos polígonos de la zona núcleo con el establecimiento de un corredor incorporando esta zona de alta prioridad en la zona núcleo. De hecho, el análisis de conectividad entre hábitats establece un área muy grande que abarca extensiones importantes de los polígonos de la zona núcleo, así como la zona de parches coralinos reticulados en el área de amortiguamiento conectado de esta forma el polígono norte con el polígono sur de la zona núcleo. Y de la misma manera, el análisis de β -diversidad establece un área continua de alta prioridad de norte a sur que abarca casi 2/3 de la plataforma arrecifal, incluyendo la misma zona de parches coralinos reticulados.

Una razón adicional para sustentar la propuesta de incluir al menos esta zona de parches coralinos reticulados, así como las estructuras coralinas cercanas a Isla Desterrada en el polígono la zona núcleo es la coincidencia espacial tanto de la actividad de pesca comercial concesionada, como de la pesca furtiva, ambas con incidencias de gran intensidad. En el caso de la zona de aprovechamiento sureste, se deberá poner sobre la mesa si esta zona de alta prioridad podría incorporarse como una extensión a la subzona de preservación de sotavento, o si pudiera incorporarse a la zona núcleo sur.

En el contexto del ejercicio de identificación áreas de la plataforma con usos y sus intensidades, se aprecian altas presencias e intensidades de uso, sobre todo de tipo pesquero, dentro de los polígonos de la zona núcleo. Esta situación brinda una ventana de oportunidad para reforzar y consolidar tanto la infraestructura como el personal de vigilancia y control de las diferentes instancias gubernamentales y civiles involucradas como la SEMARNAT (a través de la CONANP y la PROFEPA), la Secretaría de Marina, y la CONAPESCA a nivel federal; La SDS a través de la SEPASY a nivel estatal, y las cooperativas concesionadas para actividades pesqueras en el PNAA.

En términos de la calidad de los productos geográficos asociados a los escenarios de priorización, la ausencia de diferencias significativas entre las sumas de las proporciones

de las clases con mayor prioridad, establecen que el análisis de priorización es parsimonioso manteniendo la relevancia de la estructura espacial y características físicas del ambiente. De la misma manera, las diferencias espaciales en las clases de prioridad media y baja están relacionadas a la variabilidad de intensidad de uso que se maneja en cada escenario.



9. CONCLUSIÓN

El Parque Nacional Arrecifes Alacranes es el arrecife más importante del Golfo de México debido a sus características ecológicas y los servicios ecosistémicos que brinda. Los resultados de esta caracterización ecológica indican que de forma general el sistema arrecifal está en un estado regular de salud, con algunos indicadores mostrando signos de esperanza: sitios con altas coberturas de coral, ensamblajes coralinos dominados por especies constructoras y componentes sanos de peces herbívoros y comerciales, que además han aumentado en las últimas dos décadas.

Sin embargo, algunas banderas rojas nos recuerdan la fragilidad de este tipo de sistema arrecifal: la dominancia de cianobacterias, así como las altas coberturas de algas césped con sedimento y macroalgas en algunos hábitats -a pesar de un potencial de herbivoría alto- probablemente relacionado a altos niveles de nutrientes en el sistema. También, se observó la presencia -aún si estas tienen poca abundancia- de especies de peces invasoras y de enfermedades coralinas; y la existencia de estrés térmico en todos los sitios analizados principalmente actuando sobre las especies de coral que son constructoras primarias del arrecife.

De forma general, la zona núcleo norte tiene sitios con mejores condiciones ecológicas y de salud arrecifal, sin embargo, dentro de la zona de amortiguamiento existen sitios destacados por sus condiciones de salud, y hay signos de recuperación y mantenimiento de biomasa alta de peces claves, como los herbívoros. Estos resultados revelan la importancia de readaptar la zonificación actual y evaluar más en detalle las principales amenazas (estrés térmico, contaminación y pesca ilegal) en cada una de estas zonas para proponer medidas de manejo adaptadas a las necesidades de mantenimiento y recuperación de cada una de estas zonas.

No obstante, el cambio negativo que presenta el sistema en dos décadas es espacialmente amplio al involucrar el 60% de la plataforma, ocurriendo tanto en la zona núcleo como en la zona de amortiguamiento. Esta situación podría verse agravada a



mediano plazo tanto por los efectos del cambio climático global, como por la presencia de usos extractivos y los efectos de la contaminación dentro de la zona núcleo del PNAA.

De esta manera se hace urgente y necesaria tanto el fortalecimiento de las instancias encargadas del manejo del PNAA, como de la revisión y actualización del programa de manejo a la brevedad posible, incorporando el posible ajuste a los polígonos de zonificación del PNAA, para incluir áreas de alta prioridad no contempladas previamente en los polígonos de la zona núcleo. De manera particular se debe de hacer énfasis en proteger los sitios cercanos a Isla Desterrada que presentan características extraordinarias de cobertura, biomasa, funcionalidad y salud arrecifal.



10. RECOMENDACIONES

A la Dirección del Parque Nacional Arrecife Alacranes

Director Biol. Cristóbal Enrique Cáceres G. Cantón

Con base en el análisis de priorización espacial de áreas de conservación llevado a cabo en la plataforma arrecifal del Parque Nacional Arrecife Alacranes en 2022, y tomando en cuenta los resultados de las distribuciones de categorías de máxima y alta prioridad, así como las intensidades de uso definidas presentadas en este reporte.

Con el fin de incluir áreas de alta importancia ecológica dentro de la zona núcleo para minimizar la exposición de estas áreas a los usos de extracción de recursos naturales llevados a cabo en la zona de amortiguamiento, se recomienda implementar la actualización del programa de manejo del PNAA, e incluir en esta actualización la modificación a los límites de los polígonos de la zona núcleo para que incluya las siguientes áreas:

1. Estructuras de alta prioridad al sureste de Isla Desterrada, presentadas en la figura 61 de este reporte.
2. Estructuras de alta prioridad localizadas en las zonas del arrecife posterior, cresta arrecifal y frente arrecifal a sotavento de la plataforma arrecifal, presentadas en la figura 62 de este reporte.
3. Estructuras de alta prioridad del sistema de parches coralinos reticulados en la porción central de la plataforma arrecifal, presentadas en la figura 63 de este reporte.

11. REFERENCIAS

- Aburto-Oropeza O, Erisman B, Galland GR, Mascareñas-Osorio I, Sala E, Ezcurra E (2011). Large Recovery of Fish Biomass in a No-Take Marine Reserve. PLoS ONE: 6 (8), e23601.
- Agardy, T (2010). Ocean zoning: Making marine management more effective. London, UK: Earthscan/Routledge. Mencionado en: Day JC, Kenchington RA, Tanzer JM and DS Cameron (2018). Marine zoning revisited: How decades of zoning the Great Barrier Reef has evolved as an effective spatial planning approach for marine ecosystem-based management. Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst: 29(S2), 9–32.
- Arias-González JE, Acosta-González G, Garza-Pérez JR, Membrillo-Venegas N, Castro-Pérez JM (2012). Predicting spatially explicit coral reef fish abundance, richness and Shannon-Weaver index from habitat characteristics. Biodiversity and Conservation: 21(1), 115-130.
- Arias-González JE, González-Gándara C, Cabrera JL, 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.
- AGRRA. (2022). *Benthos Indicators*. Obtenido de AGRRA: <https://www.agrra.org/coral-reef-monitoring/benthos-indicator/>.
- AID Environment, National Institute for Coastal and Marine Management (RIKZ), Coastal Zone Management Centre, The Netherlands. (2004). Integrated marine and coastal area management approaches for implementing the convention on biological diversity. Montreal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

- Ault JS, Smith SG, Bohnsack JA, Luo J, Zurcher N, McClellan DB, Ziegler TA, Hall DE, Patterson M, Feeley MW, Ruttenberg BI, Hunt J, Kimball D, Causey B (2013). Assessing coral reef fish population and community changes in response to marine reserves in the Dry Tortugas, Florida, USA. *Fisheries Research*: 144, 28–37 .
- Ault JS, Smith SG, Bohnsack JA, Luo J, Harper DE, McClellan DB (2006). Building Sustainable Fisheries In Florida’s Coral Reef Ecosystem: Positive Signs In The Dry Tortugas. *Bulletin Of Marine Science*: 78(3), 633–654 .
- Bello Pineda J (1998). Sistema de clasificación para los tipos de fondo del Arrecife Alacranes compatible con una imagen Landsat TM. Tesis de Maestría en Ciencias. Biología Marina. CINVESTAV-I.P.N. 107pp.
- Bello-Pineda J, Liceaga-Correa MA (1998). Propuesta de un sistema de clasificación para los tipos de fondo del Parque Nacional Arrecife Alacranes compatible con una imagen Landsat TM. *Proc. 50th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 191-205pp.
- Bello Pineda J; Rios V, Liceaga MA , Zetina C, Cervera K, Arceo P, Hernandez H (2005). Incorporating spatial analysis of habitat into spiny lobster (*Panulirus argus*) stock assessment at Alacranes reef, Yucatan, México. *Fisheries Research*: 73, 37–47.
- Bello-Pineda J, Liceaga-Correa MA, Hernández-Nuñez, Ponce-Hernández R (2005). Using aerial video to train the supervised classification of landsat tm imagery for coral reef habitats mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*: 105, 145–164. DOI: 10.1007/s10661-005-3499-y.
- Bonet F (1967). Biogeología subsuperficial del Arrecife Alacranes, Yucatán (México). *An. Esc. Nac. Cien. Biol. México*. 6(1-4):15-59.

- Bruno J.F, Petes LE, Harvell CD, Hettinger A (2003). Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. *Ecology Letters*: 6 (12), 1056-1061.
- Chávez EA, Hidalgo E (1988). Los arrecifes coralinos del caribe noroccidental y Golfo de México en el contexto socioeconómico. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. U.N.A.M.* 15(1): 167-176 pp.
- CONANP. (2006). *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Arrecife Alacranes*.
- Cruz-Vázquez C, Rioja-Nieto R, Enriquez C (2019). Spatial and temporal effects of management on the reef seascape of a marine T protected area in the Mexican Caribbean. *Ocean and Coastal Management*: 169, 50–57
- Eliason EM, McEwen AS (1990). Adaptive Box Filters for Removal of Random Noise from Digital Images. *Photogramm. Eng. Remote Sens*: 56, 453.
- Day JC, Kenchington RA, Tanzer JM, Cameron DS (2018). Marine zoning revisited: How decades of zoning the Great Barrier Reef has evolved as an effective spatial planning approach for marine ecosystem-based management. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst*: 29(S2), 9–32.
- De la Cruz GE, Martínez E, Muñoz R (1993a). Propuesta de zonificación del Arrecife Alacranes Yucatán, CINVESTAV, Mérida.
- De la Cruz GE, Martínez E, Muñoz R (1993b). Propuesta para decretar al Arrecife Alacranes, Yucatán como Reserva de la Biosfera, CINVESTAV, Mérida.
- ERDAS Field Guide (1999). 5th Edition, ERDAS Inc. Atlanta GA, USA, 672pp.

- Fabricius KE (2005). *Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis*. Marine Pollution Bulletin: 50(2), 125-146.
- Folk RL, Robles R (1964). Carbonate sands of Isla Perez, Alacran Reef Complex, Yucatan. J Geol 72:255-292.
- Folk RL (1967). Sand cays of Alacran Reef, Yucatan, Mexico: Morphology. J Geol 75:412-437 .
- Forst MF (2009). The convergence of integrated coastal zone management and the ecosystems approach. Ocean and Coastal Management 52, 294-306.
- Garza Pérez JR (2004). Información y Manejo para la Protección de la Biodiversidad de la Barrera Arrecifal de México: Evaluación de Variables, Modelación Espacial del Hábitat y SIG. Tesis de Doctorado en Ciencias Marinas. CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, México. 189 pp.
- Garza-Pérez JR, Lehmann A, Arias-González JE (2004). Spatial Prediction of Coral Reef Habitats: Integrating Ecology with Spatial Modeling and Remote Sensing. Marine Ecology Progress Series 269:141-152.
- Garza-Pérez JR, Barrón-Coronel F. (2021). Coral Reef Benthos Classification Using Data from a Short-Range Multispectral Sensor. Remote Sens.: 14, 5782. <https://doi.org/10.3390/rs14225782>
- Goodman J, Purkis SJ, Phinn SR (2013). Coral Reef Remote Sensing; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- González´Gándara C (2001). Las comunidades de peces del Arrecife Alacranes, Yucatán, México: Variaciones espacio-temporales. Tesis Doctoral en Ciencias Marinas. CINVESTAV-I.P.N. 192pp.

- González Gándara C, Arias González JE (2004). Los Pomacéntridos del Arrecife Alacranes, Yucatán , México, Composición, Distribución y Abundancia. *Rev. Invest. Mar*: 25(3), 231-239.
- Guerry AD (2005). Icarus and Daedalus: conceptual and tactical lessons for marine ecosystem-based management. *Frontiers in Ecology and the Environment*: 3(4), 202–11.
- Harborne AR, Mumby PJ (2006). Modeling the beta diversity of coral reefs. *Ecology* 87(11): 2871-2881.
- Harvell D, Jordán-Dahlgren E, Merkel S, Rosenberg E, Raymundo L, Smith G, Weil E, Willis B (2007). Coral Disease Environmental Drivers and the Balance Between Coral and Microbial Associates. *Oceanography*: 20(1), 172-195.
- Healthy Reefs (2022). Essential report card for the mesoamerican reef https://www.healthyreefs.org/cms/wp-content/uploads/2022/06/HRI-2022-RC-Essentials_LoRes_final.pdf (accesado 3 diciembre 2022).
- Hedley JD, Harborne AR, Mumby PJ (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow water benthos. *Int. J. Remote Sens.*: 26, 2107–2112.
- Hexagon (2021). ERDAS Field Guide http://wiki.hexagongeospatial.com/index.php?title=Main_page
- Hildebrand HH, Chávez H, Compton H (1964). Aporte al conocimiento de los peces del arrecife Alacránres, Yucatán (México). *Ciencia*: 23(3), 107-134.
- Hodgson G (1990). *Sediment and the settlement of larvae of the reef coral Pocillopora damicornis*. *Coral Reefs*: 9(1), 41-43.

Holt SJ, Talbot LM (1978). New principles for the conservation of wild living resources. wildlife monographs, no. 59, Supplement to. The Journal of Wildlife Management 43(no. 2). Mencionado en: Forst MF (2009). The convergence of integrated coastal zone management and the ecosystems approach. Ocean and Coastal Management: 52, 294-306.

Kirkman H (2013). Choosing boundaries to marine protected areas and zoning the MPAs for restricted use and management. Ocean & Coastal Management: 81, 38-48.

Knudby A, Roelfsema C, Lyons M, Phinn S, Jupiter S (2011). Mapping Fish Community Variables by Integrating Field and Satellite Data, Object-Based Image Analysis and Modeling in a Traditional Fijian Fisheries Management Area. Remote Sens.: 3, 460-483. doi:10.3390/rs3030460

Kornicher LS, Boyd DW (1962). Shallow water geology and environments of Alacran Reef complex, Campeche Bank, Mexico. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.: 46(5), 640-673.

Laffoley Dd'A, et al. (2004) The ecosystem approach. Coherent actions for marine and coastal environments. A report to the UK government. English Nature: 65pp.

LANRESC. (2021). *Tarjeta de Reporte Arrecife Alacranes*.

Liceaga-Correa MA, Euan-Avila JI (2002). Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible Landsat Thematic Mapper data. International Journal of Remote Sensing: 23(1), 3–14.

Liddell WD, Ohlhorst SL (1988). Comparison of Western Atlantic coral reef communities, Procs. 6th International Coral Reef Symposium: Vol. 3: p. 281-286. Townsville, Australia.



- Logan BW (1969). Carbonate sediments and reefs, Yucatan Shelf, Mexico. Am Assoc Pet Geol, Memoir 11, Part 1, 129-198 .
- Lyzenga DR (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. International Journal of Remote Sensing: 10, 53–69.
- Macintyre IG, Burke RB, Syukerath R (1977). Thickest recorded Holocene reef section, Isla Pérez core hole, Alacran Reef, Mexico. Geology. 5: 749-753.
- McField M, Kramer P, Giró-Petersen A, Melina S, Drysdale I, Craig N, Ruedas M (2020). *Reporte del Arrecife Mesoamericano*.
- Membrillo-Venegas N (1999). Descripción de los paisajes arrecifales en la laguna del arrecife Alacranes, Yucatán México. Tesis de Maestría, CINVESTAV, I.P.N. Unidad Mérida, 100 pp.
- Novak MJ (1992). Sedimentology and Community Structure of Reefs of the Yucatan Peninsula, Mexico. Unpub Master's Thesis, Utah State Univ, 96 pp.
- Novak MJ, Lidell WD, Torruco D (1992). Sedimentology and Community Structure of Reefs of the Yucatan Peninsula, Mexico. Proc. 7th Intl. Coral Reef Symposium, Guam, Vol 1, 265-272.
- Núñez Morales ND (2021). Cartografía y Monitoreo de Cobertura Bentónica Arrecifal Mediante Sensores Remotos Emergentes. Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 96 pp.
- OCEANA (2022). *Informe Ejecutivo de la Expedición Científica OCEANA en México: Proyecto Alacranes*.

- Ortiz Cajica AK, Hinojosa-Arango G, Garza-Pérez JR, Rioja-Nieto R (2020). Seascape metrics, spatio-temporal change, and intensity of use for the spatial conservation prioritization of a Caribbean marine protected area. *Ocean and Coastal Management*: 194, 105265 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105265>
- Perry CT, Alvarez-Filip L (2019). Changing geo-ecological functions of coral reefs in the anthropocene. *Funct. Ecol.*: 33(6), 976–988. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13247>.
- Pittman SJ, Christensen JD, Caldow C, Menza C, Monaco, ME (2007). Predictive mapping of fish species richness across shallow-water seascapes in the Caribbean. *Ecol. Model.*: 204, 9-21.
- R Core Team (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Randazzo-Eisemann A (2019). *Understanding resilience through a multi-scale approach in a Caribbean “reef of hope”: Cordelia Bank Marine Protected Area*. Mérida.
- Randazzo-Eisemann A, Arias-González JE, Velez L, McField M, Mouillot D (2021). *The last hotspots of structural complexity as conservation targets in the Mesoamerican Coral Reef*. *Biol Conservation*: 256, 109021.
- Randazzo-Eisemann A, Garza-Pérez JR, Figueroa-Zavala B (2022). The role of coral diseases in the flattening of a Caribbean Coral Reef over 23 years. *Marine Pollution Bulletin*: 181, 113855.
- Reyes-Bonilla H, Alvarez-Filip L (2008). Long-term changes in taxonomic distinctness and trophic structure of reef fishes at Cabo Pulmo reef, Gulf of California,

Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008.

Rioja-Nieto R, Sheppard C (2008). Effects of management strategies on the landscape ecology of a Marine Protected Area. *Ocean & Coastal Management*: 51(5), 397-404.

Rioja-Nieto R, Barrera-Falcón E, Hinojosa-Arango G, Riosmena-Rodriguez R (2008). Benthic habitat b-diversity modeling and landscape metrics for the selection of priority conservation areas using a systematic approach: Magdalena Bay, Mexico, as a case study. *Ocean & Coastal Management*: 82, 95-103.

Storlazzi CD, Field ME, Bothner MH, Presto MK, Draut AE (2009). Controls on sediment dynamics in a coral reef embayment: Hanalei Bay, Kauai. *Mar Geol*: 264, 140–151.

Suchley A, Alvarez-Filip L (2018). Local human activities limit marine protection efficacy on Caribbean coral reefs, *Conservation Letters*. DOI: 10.1111/conl.12571.

Tuz-Sulub, A (2008). Agregaciones de desove de mero (Serranidae: Epinephelus sp. y Mycteroperca sp.) en áreas del Banco de Campeche, Yucatán, México. PhD Thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

Tuz-Sulub A, Aguilar-Perera A (2012). Validación de una agrupación de desove de mero payaso, *Epinephelus guttatus*, en parque nacional Arrecife Alacranes frente a la costa norte de la Península de Yucatán, México. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*: 64, 232–236.

Tuz-Sulub A, Cervera-Cervera K, Colás-Marrufo T, Brulé T (2003). Primeros indicios sobre la formación de agregaciones de reproducción de meros (Epinephelinae;



Epinephelini) en el Banco de Campeche, México. Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute 54, 652–667.

Tuz-Sulub A, Cervera-Cervera K, Espinoza-Mendez JC, Brulé T (2006). Primeras descripciones de la agregación de desove del mero colorado, *Epinephelus guttatus*, en el Parque Marino Nacional “Arrecife Alacranes” de la plataforma yucateca. Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute: 57, 525–534.

Tuz-Sulub A, Brulé T (2015). Spawning aggregations of three protogynous groupers in the southern Gulf of Mexico. Journal of Fish Biology: 86, 162–185 doi:10.1111/jfb.12555.

USGS (2021). United States Geological Survey, Landsat Missions, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/science>.

Voss JD, Richardson LL (2006). Nutrient enrichment enhances black band disease progression in corals. Coral Reefs: 25, 569–576. DOI 10.1007/s00338-006-0131-8.

Zlatarski VN (1984). Preliminary notes on the scleractinians and reefs of southeastern Mexico. Advances in reef sciences. A joint meeting of the Atlantic Reef Community and The International Society for Reef Studies. October 26-28. Miami, FL.

12. ANEXOS

Tabla A1. Listado de familias y especies de corales escleractíneos registrados en Alacranes, en el Plan de Manejo (PM), y las campañas de OCEANA 2021 y 2022.

	Familia	Nombre científico	Fuente
1		<i>Acropora cervicornis</i>	PM, OCEANA 2022
2	Acroporidae	<i>Acropora palmata</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
3		<i>Acropora prolifera</i>	PM, OCEANA 2022
4		<i>Agaricia agaricites</i>	OCEANA 2021, 2022
5	Agariciidae	<i>Agaricia fragilis</i>	OCEANA 2022
6		<i>Agaricia lamarcki</i>	OCEANA 2021, 2022
7		<i>Agaricia tenuifolia</i>	OCEANA 2022
8		<i>Hellioseris cucullata</i>	PM, OCEANA 2022
9	Astrocoeniidae	<i>Stephanocoenia intersepta</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
10	Cladocoridae	<i>Cladocora arbuscula</i>	PM
11	Faviidae	<i>Favia fragum</i>	PM, OCEANA 2022
12		<i>Manicina areolata</i>	PM, OCEANA 2022
13	Meandrinidae	<i>Dichocoenia stokesi</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
14		<i>Eusmilia fastigiata</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
15		<i>Meandrina meandrites</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
16	Montastraeidae	<i>Montastraea cavernosa</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
17		<i>Orbicella annularis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
18		<i>Orbicella faveolata</i>	OCEANA 2021, 2022
19		<i>Orbicella franksi</i>	OCEANA 2021, 2022
20		<i>Colpophyllia natans</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
21		<i>Diploria labyrinthiformis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
22		<i>Isophyllia sinuosa</i>	PM
23		<i>Mussa angulosa</i>	PM
24	Mussidae	<i>Mycetophyllia aliciae</i>	OCEANA 2021
25		<i>Mycetophyllia ferox</i>	OCEANA 2021, 2022
26		<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	PM, OCEANA 2022
27		<i>Pseudodiploria clivosa</i>	OCEANA 2021, 2022
28		<i>Pseudodiploria strigosa</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
29		<i>Scolymia lacera</i>	PM
30	Oculinidae	<i>Oculina diffusa</i>	PM
31	Pocilloporidae	<i>Madracis decactis</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
32	Poritidae	<i>Porites astreoides</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
33		<i>Porites furcata</i>	OCEANA 2022
34		<i>Porites porites</i>	PM, OCEANA 2021, 2022
35	Rhizangiidae	<i>Astrangia solitaria</i>	PM
36	Siderastreidae	<i>Siderastrea siderea</i>	OCEANA 2021, 2022
37		<i>Siderastrea radians</i>	PM, OCEANA 2021, 2022

Tabla A2. Listado de familias y especies de peces registrados en Alacranes, en el Plan de Manejo (PM), la campaña del CINVESTAV (CV) y OCEANA 2022.

Clase	Familia	Nombre científico	Fuente	
Chondrichtios	Carcharhinidae	<i>Carcharhinus falciformis</i>	PM	
		<i>Carcharhinus leucas</i>	PM	
		<i>Carcharhinus limbatus</i>	PM	
		<i>Carcharhinus perezi</i>	PM	
		<i>Carcharhinus plumbeus</i>	PM	
	Ginglymostomatidae	<i>Ginglymostoma cirratum</i>	PM	
	Dasyatidae	<i>Dasyatis americana</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
	<i>Dasyatis sabina</i>	PM		
	Mobulidae	<i>Manta birostris</i>	PM	
	Myliobatidae	<i>Aetobatus narinari</i>	PM, OCEANA 2022	
	Narcinidae	<i>Narcine brasiliensis</i>	PM	
	Rhinobatidae	<i>Pseudobatos lentiginosus</i>	PM	
	Urotrygonidae	<i>Urolophus jamaicensis</i>	CV, PM	
Osteictios	Acanthuridae	<i>Acanthurus chirurgus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
		<i>Acanthurus coeruleus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
		<i>Acanthurus tractus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
	Apogonidae	<i>Apogon maculatus</i>	PM	
		<i>Astrapogon stellatus</i>	PM	
	Atherinidae	<i>Hypoatherina harringtonensis</i>	CV, OCEANA 2022	
	Aulostomidae	<i>Aulostomus maculatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
	Balistidae	<i>Balistes vetula</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
		<i>Canthidermis sufflamen</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
		<i>Melichthys niger</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
		Batrachoididae	<i>Opsanus pardus</i>	PM
			Belonidae	<i>Strongylura marina</i>
	<i>Strongylura notata</i>	PM		
	<i>Hyleurochilus bermudensis</i>	PM		
	Blenniidae	<i>Ophioblennius atlanticus</i>	CV	
		<i>Ophioblennius macclurei</i>	PM	
		<i>Parablennius marmoreus</i>	PM	
	Carangidae	<i>Alectis ciliaris</i>	PM	
		<i>Caranx bartholomaei</i>	PM	
		<i>Caranx crysos</i>	CV	
		<i>Caranx hippos</i>	PM, OCEANA 2022	
		<i>Caranx latus</i>	OCEANA 2022	

Tabla A2. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	Fuente	
36		<i>Caranx ruber</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
37	Carangidae	<i>Seriola rivoliana</i>	PM	
38		<i>Trachinotus carolinus</i>	PM	
39		<i>Trachinotus goodei</i>	PM	
40	Chaenopsidae	<i>Chaenopsis ocellata</i>	PM	
41		<i>Emblemaria pandionis</i>	PM	
42		<i>Emblemariopsis bahamensis</i>	PM	
43		<i>Hemiemblemaria simula</i>	PM, OCEANA 2022	
44		<i>Lucayablennius zingaro</i>	OCEANA 2022	
45	Chaetodontidae	<i>Chaetodon capistratus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
46		<i>Chaetodon ocellatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
47		<i>Chaetodon sedentarius</i>	CV, PM	
48		<i>Chaetodon striatus</i>	PM, OCEANA 2022	
49		Cirrhitidae	<i>Amblycirritus pinos</i>	PM
50	Clupeidae	<i>Harengula clupeola</i>	PM	
51	Diodontidae	<i>Chilomycterus antennatus</i>	OCEANA 2022	
52		<i>Diodon holocanthus</i>	CV, OCEANA 2022	
53		<i>Diodon hystrix</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
54	Echeneidae	<i>Echeneis neucratoides</i>	PM	
55	Engraulinae	<i>Anchoa lamprotaenua</i>	PM	
56	Gerreidae	<i>Eucinostomus jonesi</i>	PM	
57		<i>Gerres cinereus</i>	PM	
58		<i>Ulaema lefroyi</i>	PM	
59		<i>Coryphopterus dicrus</i>	PM	
60	Osteictios	<i>Coryphopterus eidolon</i>	PM, OCEANA 2022	
61		<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	PM, OCEANA 2022	
62		<i>Coryphopterus hyalinus</i>	PM, OCEANA 2022	
63		Gobiidae	<i>Elacatinus oceanops</i>	PM, OCEANA 2022
64			<i>Elacatinus xanthiprora</i>	PM
65			<i>Gnatholepis thompsoni</i>	OCEANA 2022
66			<i>Microgobius carri</i>	PM
67			<i>Ptereleotris calliura</i>	CV, PM
68			<i>Ptereleotris helenae</i>	CV, PM
69		Grammatidae	<i>Gramma loreto</i>	CV, PM, OCEANA 2022
70		<i>Anisotremus surinamensis</i>	PM	
71		<i>Anisotremus virginicus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
72	Haemulidae	<i>Haemulon album</i>	PM	
73		<i>Haemulon aurolineatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
74		<i>Haemulon carbonarium</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
75		<i>Haemulon chrysargyreum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
76		<i>Haemulon flavolineatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
77		<i>Haemulon melanurum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
78		<i>Haemulon parra</i>	PM	
79		<i>Haemulon plumierii</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
80		<i>Haemulon sciurus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
81		<i>Haemulon vittatum</i>	CV, PM	
82	Hemiramphidae	<i>Hemiramphus brasiliensis</i>	PM	
83	Holocentridae	<i>Holocentrus adscensionis</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
84		<i>Holocentrus rufus</i>	CV, PM	
85		<i>Myripristis jacobus</i>	PM	
86		<i>Sargocentron vexillarium</i>	CV, PM	
87	Kyphosidae	<i>Kyphosus spp.</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
88	Labridae	<i>Bodianus pulchellus</i>	PM	
89		<i>Bodianus rufus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
90		<i>Clepticus parrae</i>	CV, OCEANA 2022	
91		<i>Halichoeres bivittatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	

Tabla A2. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	Fuente	
92		<i>Halichoeres caudalis</i>	OCEANA 2022	
93		<i>Halichoeres garnoti</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
94		<i>Halichoeres maculipinna</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
95		<i>Halichoeres pictus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
96		<i>Halichoeres poeyi</i>	PM, OCEANA 2022	
97	Labridae	<i>Halichoeres radiatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
98		<i>Lachnolaimus maximus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
99		<i>Thalassoma bifasciatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
100		<i>Xyrichtys martinicensis</i>	PM	
101		<i>Xyrichtys novacula</i>	PM	
102		<i>Xyrichtys splendens</i>	CV	
103	Labrisomidae	<i>Gobioclinus filamentosus</i>	PM	
104		<i>Labrisomus gobio</i>	PM	
105		<i>Labrisomus nuchipinnis</i>	PM	
106		<i>Malacoctenus macropus</i>	OCEANA 2022	
107		<i>Malacoctenus triangulatus</i>	PM, OCEANA 2022	
108		<i>Malacoctenus versicolor</i>	PM	
109	Lutjanidae	<i>Lutjanus analis</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
110		<i>Lutjanus apodus</i>	PM, OCEANA 2022	
111		<i>Lutjanus buccanella</i>	OCEANA 2022	
112		<i>Lutjanus griseus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
113		<i>Lutjanus jocu</i>	OCEANA 2022	
114		<i>Lutjanus mahogoni</i>	PM	
115		<i>Lutjanus synagris</i>	CV, PM	
116		<i>Ocyurus chrysurus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
117		<i>Rhomboplites aurorubens</i>	PM	
118	Malacanthidae	<i>Malacanthus plumieri</i>	PM, OCEANA 2022	
119	Osteictios	<i>Aluterus schoepfi</i>	PM	
120			<i>Aluterus scriptus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
121		Monacanthidae	<i>Cantherhines macrocerus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
122			<i>Cantherhines pullus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
123			<i>Monacanthus tuckeri</i>	CV, OCEANA 2022
124	Mullidae	<i>Mulloidichthys martinicus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
125		<i>Pseudupeneus maculatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
126	Muraenidae	<i>Gymnothorax funebris</i>	PM	
127		<i>Gymnothorax miliaris</i>	PM	
128		<i>Gymnothorax moringa</i>	CV, PM	
129		<i>Gymnothorax vicinus</i>	PM	
130	Ogcocephalidae	<i>Ogcocephalus radiatus</i>	PM	
131	Opistognathidae	<i>Opistognathus aurifrons</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
132		<i>Opistognathus macrognathus</i>	PM	
133	Ostraciidae	<i>Acanthostracion polygonia</i>	PM, OCEANA 2022	
134		<i>Acanthostracion quadricornis</i>	PM	
135		<i>Lactophrys bicaudalis</i>	CV, PM	
136		<i>Lactophrys trigonus</i>	PM	
137		<i>Lactophrys triqueter</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
138	Pempheridae	<i>Pempheris schomburgky</i>	PM	
139	Pomacanthidae	<i>Centropyge argi</i>	PM, OCEANA 2022	
140		<i>Holacanthus bermudensis</i>	CV, OCEANA 2022	
141		<i>Holacanthus ciliaris</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
142		<i>Holacanthus tricolor</i>	PM	
143		<i>Pomacanthus arcuatus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
144		<i>Pomacanthus paru</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
145			<i>Abudefduf saxatilis</i>	CV, PM, OCEANA 2022
146	Pomacentridae	<i>Chromis cyanea</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
147		<i>Chromis enchrysurus</i>	PM	

Tabla A2. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	Fuente	
148		<i>Chromis insolata</i>	CV	
149		<i>Chromis multilineata</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
150		<i>Chromis scotti</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
151		<i>Microspathodon chrysurus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
152		<i>Neopomacentrus cyanomos</i>	OCEANA 2022	
153	Pomacentridae	<i>Stegastes adustus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
154		<i>Stegastes diencaeus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
155		<i>Stegastes leucostictus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
156		<i>Stegastes partitus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
157		<i>Stegastes planifrons</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
158		<i>Stegastes variabilis</i>	CV	
159		Priacanthidae	<i>Heteropriacanthus cruentatus</i>	PM
160		Rachycentridae	<i>Rachycentron canadum</i>	PM
161			<i>Cryptotomus roseus</i>	CV, PM
162			<i>Scarus coelestinus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
163		<i>Scarus coeruleus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
164		<i>Scarus guacamaia</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
165		<i>Scarus iseri</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
166		<i>Scarus taeniopterus</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
167	Scaridae	<i>Scarus vetula</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
168		<i>Sparisoma atomarium</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
169		<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
170		<i>Sparisoma chrysopterygum</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
171		<i>Sparisoma radians</i>	CV, PM	
172		<i>Sparisoma rubripinne</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
173		<i>Sparisoma viride</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
174			<i>Equetus punctatus</i>	PM, OCEANA 2022
175		Osteictios	<i>Equetus umbrosus</i>	PM
176			Scianidae	<i>Pareques acuminatus</i>
177			<i>Odontoscion dentex</i>	PM
178		<i>Auxis thazard</i>	PM	
179	Scombridae	<i>Scomberomorus regalis</i>	CV, PM	
180		<i>Pterois spp.</i>	OCEANA 2022	
181	Scorpaenidae	<i>Scorpaena plumieri</i>	CV, PM	
182			<i>Diplectrum formosum</i>	PM
183		<i>Cephalopholis cruentata</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
184		<i>Cephalopholis fulva</i>	OCEANA 2022	
185		<i>Epinephelus adscensionis</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
186		<i>Epinephelus guttatus</i>	CV, PM	
187		<i>Epinephelus itjara</i>	PM	
188		<i>Epinephelus morio</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
189		<i>Epinephelus striatus</i>	CV, OCEANA 2022	
190		<i>Hypoplectrus aberrans</i>	PM	
191		<i>Hypoplectrus chlorurus</i>	CV, OCEANA 2022	
192		<i>Hypoplectrus gemma</i>	CV	
193	Serranidae	<i>Hypoplectrus guttavarius</i>	CV, PM	
194		<i>Hypoplectrus indigo</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
195		<i>Hypoplectrus nigricans</i>	CV, PM	
196		<i>Hypoplectrus puella</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
197		<i>Hypoplectrus unicolor</i>	CV, PM	
198		<i>Mycteroperca bonaci</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
199		<i>Mycteroperca interstitialis</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
200		<i>Mycteroperca tigris</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
201		<i>Mycteroperca venenosa</i>	CV, PM, OCEANA 2022	
202			<i>Paranthias furcifer</i>	CV, PM
203		<i>Rypticus saponaceu</i>	PM	

Tabla A2. Continuación.

Clase	Familia	Nombre científico	Fuente
204		<i>Serranus baldwini</i>	CV, PM
205	Serranidae	<i>Serranus tabacarius</i>	CV, PM, OCEANA 2022
206		<i>Serranus tigrinus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
207		<i>Serranus tortugarum</i>	CV, PM
208		<i>Archosargus rhomboidalis</i>	PM
209	Sparidae	<i>Calamus bajonado</i>	CV, PM, OCEANA 2022
210		<i>Calamus calamus</i>	CV, PM, OCEANA 2022
211		<i>Calamus penna</i>	CV, PM
212		<i>Calamus pennatula</i>	CV, PM, OCEANA 2022
213		<i>Calamus proridens</i>	CV, PM
214	Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i>	CV, PM, OCEANA 2022
215		<i>Sphyraena picudilla</i>	PM
216	Spratelloididae	<i>Jenkinsia lamprotaenia</i>	PM
217		<i>Jenkinsia majua</i>	PM
218	Synodontidae	<i>Synodus intermedius</i>	CV, PM
219		<i>Synodus saurus</i>	CV
220	Tetraodontidae	<i>Canthigaster rostrata</i>	CV, PM, OCEANA 2022
221		<i>Sphoeroides spengleri</i>	CV, PM, OCEANA 2022
222	Tripterygiinae	<i>Enneanectes jordani</i>	PM

Tabla A3. Listado de familias y especies de corales escleractíneos y peces que representan potenciales nuevos registros, al no haber sido aún registrados en el Plan de Manejo o las campañas del CINVESTAV 1998 y OCEANA 2021.

	Taxa	Familia	Nombre científico
1	Corales duros	Agariciidae	<i>Agaricia fragilis</i>
2			<i>Agaricia tenuifolia</i>
3		Poritidae	<i>Porites furcata</i>
4		Carangidae	<i>Caranx latus</i>
5		Chaenopsidae	<i>Lucayablennius zingaro</i>
6		Diodontidae	<i>Chilomycterus antennatus</i>
7		Gobiidae	<i>Gnatholepis thompsoni</i>
8		Labridae	<i>Halichoeres caudalis</i>
9	Peces	Labrisomidae	<i>Malacoctenus macropus</i>
10		Lutjanidae	<i>Lutjanus buccanella</i>
11			<i>Lutjanus jocu</i>
12		Pomacanthidae	<i>Holacanthus bermudensis</i>
13		Pomacentridae	<i>Neopomacentrus cyanomos</i>
14		Scorpaenidae	<i>Pterois spp.</i>
15		Serranidae	<i>Cephalopholis fulva</i>