

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Evaluación de los cambios en la funcionalidad física de los
arrecifes de coral del Parque Nacional Islas Marietas a partir
de los esfuerzos de restauración activa llevados a cabo
durante 2014-2021**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias

Presenta:

Adahara Muñoz Alfaro

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Adahara Muñoz Alfaro

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Dr. Luis Alberto Delgado Argote

Dra. Alma Paola Rodríguez Troncoso

Dra. Ma. Elena Solana Arellano



Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Adahara Muñoz Alfaro** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ecología Marina

Evaluación de los cambios en la funcionalidad física en los arrecifes de coral del Parque Nacional Islas Marietas a partir de los esfuerzos de restauración activa llevados a cabo durante 2014-2021

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Los arrecifes coralinos constituyen uno de los ecosistemas marinos más biodiversos del planeta, además de proveer funciones geo-ecológicas de gran valor. Sin embargo, son afectados debido a diversos estresores tanto naturales como de origen antrópico. En respuesta a la situación anteriormente planteada, se han implementado medidas de restauración activa, como en el caso de la comunidad coralina del Parque Nacional Islas Marietas (PNIM). Este trabajo tiene como objetivo evaluar los cambios en la funcionalidad física a partir de los esfuerzos de restauración activa llevados a cabo en las comunidades coralinas del PNIM durante 2014-2021. Se utilizó el índice de función arrecifal (IFA) como métrica de la funcionalidad física (FF) puesto que es una manera más completa de comprender el estado en el que se encuentran las comunidades coralinas. El IFA considera tres atributos ecológicos específicos: cobertura coralina (CC), tasa de calcificación y complejidad estructural. Se calculó el IFA en seis sitios dentro del PNIM, diferenciando transectos restaurados (R) y no restaurados (NR), se analizó a tres niveles espaciales (parque, islas y sitios) y para cada uno de los años de estudio. Los resultados mostraron que, en la mayoría de los transectos restaurados, tanto la CC como el IFA tienen una tendencia positiva a través del tiempo, además, se obtuvo un aumento significativo en ambas variables en los transectos donde se llevaron a cabo acciones de restauración activa en comparación con aquellos sin restauración. Los resultados de este estudio demuestran que la restauración en el PNIM utilizando fragmentos de pocilopóridos está siendo efectiva en términos de funcionalidad física. Debido al alto aporte a la FF que tiene el género se está logrando recuperar la estructura arrecifal en mayor medida en transectos con restauración activa comparados con los transectos en los que no hay intervención, acercándose a los valores históricos (1996-1997), incluso en sitios en donde naturalmente la FF no ha logrado recuperarse.

Palabras clave: calcificación, complejidad estructural, ecología funcional, funciones geo-ecológicas, Pacífico mexicano

Abstract of the thesis presented by **Adahara Muñoz Alfaro** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology

Evaluation of changes in physical functionality in the coral reefs of Islas Marietas National Park based on active restoration efforts conducted during 2014-2021

Abstract approved by:

PhD Rafael Andrés Cabral Tena
Thesis Director

Coral reefs constitute one of the most biodiverse marine ecosystems on the planet, in addition to providing highly valuable geo-ecological functions. However, they are affected due to various stressors, both natural and of anthropogenic origin. In response to the above situation, active restoration measures have been implemented, as in the case of the coral community of the Islas Marietas National Park (PNIM). This study aims to evaluate the changes in the physical functionality from the active restoration efforts carried out in the coral communities of the PNIM during 2014-2021. The reef functional index (IFA) was used as a physical functionality (FF) metric since it is a more complete way of understanding the state of coral communities. The IFA considers three specific ecological attributes: coral cover (CC), calcification rate, and structural complexity. The IFA was calculated at six sites within the PNIM, differentiating between restored (R) and non-restored (NR) transects, it was analyzed at three spatial levels (park, islands, and sites) and for each of the study years. The results showed that, in most of the restored transects, both the CC and the IFA have a positive trend over time, in addition, a significant increase was obtained in both variables in the transects where active restoration actions were carried out compared to those without restoration. The results of this study demonstrate that the restoration in the PNIM using fragments of pocilloporids is being effective in terms of physical functionality. Due to the high contribution to the FF that the genus has, the reef structure is being recovered to a greater extent in transects with active restoration compared to transects in which there is no intervention, approaching historical values (1996-1997), even in places where naturally the FF has not been able to recover.

Keywords: calcification, structural complexity, functional ecology, geo-ecological functions, Mexican Pacific

Dedicatoria

A mi momi, a mi pa y,
en especial, a mi abueliño,
quien ya no pudo tener en sus manos este escrito
pero, está presente en cada una de estas líneas.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por darme la oportunidad y herramientas necesarias para crecer profesionalmente; al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico que me brindaron a través de la beca y poder realizar mis estudios de posgrado (CVU 1135762); y, al proyecto Ciencia de Frontera CONAHCYT CF 2019/866397 “Evaluación de la función geo-ecológica de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano”, por brindar el financiamiento para llevar a cabo esta investigación.

A mi comité: a la Dra. A. Paola Rodríguez por cada una de sus observaciones, comentarios, por dar mucha luz en el entendimiento de las comunidades coralinas del PNIM y por brindar las bases de datos para poder realizar esta investigación (por supuesto, también por todas las risas compartidas); a la Dra. Ma. Elena Solana por su guía y por brindar un valioso apoyo a través de sus conocimientos estadísticos (sí, de repente me hacía temblar); al Dr. Luis Alberto Delgado por todas sus sugerencias, comentarios y por aportar una visión distinta a esta investigación; y, en especial, a mi director de tesis, el Dr. Rafael Cabral, por haber creído en mí desde el primer momento, por su apoyo incondicional tanto académico como personal, por haber sido mi guía en este maravilloso mundo de los corales, por todas las enseñanzas y herramientas brindadas para poder en algún momento llegar a ser una coralóloga como él (con ese amor, pasión y sentido de protección a los corales) y, por supuesto, por todas esas paletas que endulzaban los momentos de mayor caos.

A los investigadores que con todo su esfuerzo permitieron que la información necesaria estuviera en nuestras manos para poder realizar esta investigación y por apoyarme para hacer posible que publicara mi primer artículo: al Dr. Amílcar Cupul Magaña, al Dr. Adolfo Tortolero, a la Dra. Paola Rodríguez (¡aquí también!) y al Dr. Rafael Cabral.

A mi momi, por ser mi apoyo incondicional, por tu amor, por siempre estar, por compartir este sueño conmigo y por ser mi gran ejemplo para seguir. A mi pa, por siempre creer en mí, por apoyarme, por respetarme y por siempre alentarme para llegar a ser la científica que desde pequeña soñé. A mi familia, porque, aunque estaba lejos, siempre los sentí cerquita. A mi abuelo, por todos los consejos, sonrisas y llamadas compartidas, por esas palabras llenas de cariño que me hacían reír al caminar al CICESE, nunca te vas a ir, te llevo eternamente en mi corazón.

A mis mosqueteras, Nad y Eve, que se han vuelto mis hermanas, por las lágrimas y risas compartidas, por todo ese apoyo y palabras de aliento brindadas cuando pensábamos que no podíamos más, por vivir este sueño a mi lado y por la oportunidad de crecer juntas, sin ustedes, estos dos años no hubieran sido lo mismo. Por supuesto también a Dartañán, por siempre tener las palabras precisas en los momentos más oscuros (junto con todas esas analogías), por esa amistad que trasciende eras y por todo lo compartido. Gracias a ustedes la estadía en Ensenada se volvió mágica.

A Fabi, por haber comenzado este viaje conmigo como mi compañero de vida y terminarlo como el mejor amigo del mundo, gracias por tu amor y por alentarme a cumplir este sueño, el amor como la energía más poderosa que existe, no se pierde, solo se transforma. A todas esas personas que me han hecho ser quien hoy soy, por marcar cada etapa de mi vida y por siempre estar: Nat, Adro, Tavo, Beto, Ian.

Al Universo, la Pachamama y al mar, por ser mi inspiración. Todo esto es con la finalidad de protegerlos, los amo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	5
1.2 Justificación	7
1.3 Hipótesis.....	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo general.....	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
Capítulo 2. Metodología.....	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Trabajo de campo.....	11
2.2.1 Restauración.....	11
2.2.2 Monitoreo	12
2.3 Trabajo de gabinete	12
2.3.1 Índice de Función Arrecifal (IFA)	12
2.3.2 Análisis de datos.....	14

Capítulo 3. Resultados	15
3.1 Funcionalidad física a través del tiempo	15
3.2 Diferencias en el incremento de la funcionalidad física entre R y NR	23
3.3 Aporte a la funcionalidad física por géneros coralinos	25
Capítulo 4. Discusión.....	30
4.1 Funcionalidad física y cobertura coralina a través del tiempo.....	30
4.1.1 Cobertura coralina a través del tiempo	31
4.1.2 Funcionalidad física a través del tiempo	32
4.2 Diferencias en el incremento de la cobertura coralina y la funcionalidad física entre R y NR	33
4.2.1 Diferencias en el incremento de la cobertura coralina entre R y NR.....	35
4.2.2 Diferencias en el incremento de la funcionalidad física entre R y NR	37
4.3 Aporte a la funcionalidad física por géneros coralinos	39
Capítulo 5. Conclusiones	42
Literatura citada	44
Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Lista de figuras

Figura	Página
1. Representación gráfica de la hipótesis de este estudio. Se observa la diferencia en la recuperación del potencial funcional de los arrecifes del PNIM entre los transectos restaurados y los no restaurados en el año 2021 (después del inicio del programa de restauración, 2014). La funcionalidad física (FF) de las zonas restauradas muestra un incremento significativamente mayor en la FF en comparación con las zonas no restauradas.	8
2. Mapa del área de estudio y los sitios de muestreo: Isla Larga (IL); Zona de Restauración (ZR), Zona de Restauración Sur (ZRS; Cueva del Muerto (CM); Isla Redonda (IR); Playa del Amor (PA); Plataforma Pavonas (PP); y, Túnel Amarradero (TA) (Modificado de Muñoz-Alfaro <i>et al.</i> , en prensa).	10
3. Gráficas de los promedios de la cobertura coralina (CC%), de acuerdo con la condición de estudio (restaurados R, no restaurados NR), en cada uno de los niveles de estudio (parque: Parque Nacional Islas Marietas (PNIM); islas: Isla Larga e Isla Redonda; sitios: Cueva del Muerto (CM), Zona de Restauración Sur (ZRS), Zona de Restauración (ZR), Túnel Amarradero (TA), Plataforma Pavonas (PP) y Playa del Amor (PA)). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (<i>Porites panamensis</i> (Ppan), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pdam), <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pver), <i>Pocillopora capitata</i> (Pcap), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pmea), <i>Pocillopora eydouxi</i> (Peyd), <i>Pocillopora effusus</i> (Peff), <i>Pocillopora gigantea</i> (Pgig), <i>Pocillopora clavus</i> (Pcla)).....	23
4. Gráficas de los promedios del Índice de Función Arrecifal (IFA) de acuerdo con la condición de estudio (restaurados R, no restaurados NR), en cada uno de los niveles de estudio (parque: Parque Nacional Islas Marietas (PNIM); islas: Isla Larga e Isla Redonda; sitios: Cueva del Muerto (CM), Zona de Restauración Sur (ZRS), Zona de Restauración (ZR), Túnel Amarradero (TA), Plataforma Pavonas (PP) y Playa del Amor (PA)). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (<i>Porites panamensis</i> (Ppan), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pdam), <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pver), <i>Pocillopora capitata</i> (Pcap), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pmea), <i>Pocillopora eydouxi</i> (Peyd), <i>Pocillopora effusus</i> (Peff), <i>Pocillopora gigantea</i> (Pgig), <i>Pocillopora clavus</i> (Pcla)).....	25
5. Valores de CC (%) reportados por Rodríguez-Zaragoza (2001), junto con los obtenidos en el presente estudio para 2014 y 2021, a nivel de islas: Isla Larga (IL), Isla Redonda (IR). Así como para ambas condiciones de estudio: transectos restaurados (R) y transectos no restaurados (NR). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (<i>Porites panamensis</i> (Ppan), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pdam), <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pver), <i>Pocillopora capitata</i> (Pcap), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pmea), <i>Pocillopora eydouxi</i> (Peyd), <i>Pocillopora effusus</i> (Peff), <i>Pocillopora gigantea</i> (Pgig), <i>Pocillopora clavus</i> (Pcla)).....	36
6. Valores de IFA calculados a partir de los datos de cobertura coralina reportados por Rodríguez-Zaragoza (2001), junto con los calculados en el presente estudio para 2014 y 2021, a nivel de islas: Isla Larga (IL), Isla Redonda (IR). Así como para ambas condiciones de estudio: transectos restaurados (R) y transectos no restaurados (NR). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (<i>Porites panamensis</i> (Ppan), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pdam), <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pver), <i>Pocillopora capitata</i> (Pcap), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pmea), <i>Pocillopora eydouxi</i> (Peyd), <i>Pocillopora effusus</i> (Peff), <i>Pocillopora gigantea</i> (Pgig), <i>Pocillopora clavus</i> (Pcla)).	39

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Tasa de calcificación, índice de rugosidad, altura promedio y coeficiente funcional para cada una de las especies coralinas del PNIM. DE = Desviación estándar; CF = Coeficiente funcional.....	13
2. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, de las escalas espaciales parque e islas. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.	17
3. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.....	18
4. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher (Continuación de la tabla 2).	19
5. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo para las escalas espaciales parque e islas. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.	20
6. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.	21
7. Correlaciones entre el índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher (Continuación).....	22
8. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de las escalas espaciales parque e islas. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente. .	27
9. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de la escala espacial sitios. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente.	28
10. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de la escala espacial sitios. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente (continuación).	29

Capítulo 1. Introducción

La ecología funcional es un enfoque que permite analizar a los ecosistemas de tal manera que se pueda cuantificar, predecir e incluso anticipar las trayectorias que seguirán las comunidades ecológicas frente a las presiones locales y globales (Mouillot *et al.*, 2013). En ecología, el enfoque funcional está basado en el análisis de los rasgos funcionales de las especies, es decir, aquellos rasgos biológicos que influyen en el desempeño de los organismos, ya sea que tengan relación con los procesos ecosistémicos, la estabilidad del ecosistema, las interacciones biológicas o, la modificación del hábitat (Hooper *et al.*, 2005). Dentro de la Ecología Funcional, se denotan cuatro usos de la palabra “función”: (1) los procesos y las relaciones causales que los originan, (2) al papel de los organismos dentro de un ecosistema, (3) a los procesos que sustentan un sistema ecológico y, finalmente, (4) a los servicios que proporciona un sistema para humanos u otros organismos (Jax, 2005). El enfoque que enmarca el presente estudio hace referencia particular a la segunda función mencionada, que trata sobre el rol que desempeñan los diferentes organismos en el ecosistema.

Los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas más productivos y biodiversos del planeta (Burke *et al.*, 2011). Estos ecosistemas tienen un valor estimado de aproximadamente \$352,000 dólares $\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, producto de sus diversas funciones que ofrecen beneficios tanto sociales como económicos para los seres humanos, entre las que se encuentran: la obtención de alimentos, actividades de recreación y, protección de la línea de costa (Woodhead *et al.*, 2019; Allemand & Osborn, 2019). Además, desempeñan funciones geo-ecológicas esenciales como; la composición estructural y generación de microhábitats, generación de sedimentos para el sustento de las playas y costas, y la capacidad para crecer en respuesta al aumento del nivel del mar (De Groot *et al.*, 2012; Perry & Álvarez-Filip, 2018).

La base biogénica de los arrecifes coralinos son las colonias de corales escleractinios (Orden Scleractinia), los cuales son considerados organismos modulares compuestos de unidades morfológicas repetidas denominadas pólipos (Veron, 2000). Los pólipos son animales que, a nivel individual, tienen la capacidad de llevar a cabo distintas actividades fisiológicas, entre las que destaca el depósito de CaCO_3 en forma de aragonita para crecer y formar sus esqueletos (Veron, 2000). Cabe mencionar que, con base en sus características de historia de vida, que, a su vez, está relacionada con los procesos fisiológicos y los umbrales de tolerancia a las condiciones ambientales de cada especie, la morfología de la colonia y su capacidad de construcción arrecifal, las especies de corales escleractinios se han clasificado en cuatro grupos: especies competitivas, generalistas, tolerantes y oportunistas (Darling *et al.*, 2012; Estrada-

Saldívar *et al.*, 2019). Cada especie de coral tiene una función en el ecosistema, por ejemplo, capacidad de construcción del arrecife, complejidad del fondo, protección a la línea de costa, etc., las cuales pueden ser compartidas por una o más especies (Cabral-Tena *et al.*, 2018).

Los corales escleractinios cuentan con distintos atributos clave específicos en la formación de arrecifes dentro de los que destacan aquellos que determinan la capacidad de crear estructuras tridimensionalmente complejas y, con ello, sostener las funciones geoecológicas asociadas a los arrecifes, esta capacidad es conocida como Funcionalidad Física (FF) (González-Barrios & Álvarez-Filip, 2018). La FF depende de tres aspectos específicos que, en conjunto, pueden ser evaluados a través del Índice de Función Arrecifal (IFA): (1) la abundancia, que es estimada a partir del porcentaje de cobertura coralina; (2) la capacidad de acumulación de CaCO_3 , estimada a través de la tasa de calcificación; (3) la complejidad estructural, asociada al índice de rugosidad y a la altura máxima de la colonia coralina (Cabral-Tena *et al.*, 2020; González-Barrios *et al.*, 2021).

Puesto que cada especie de coral posee características que les confieren la capacidad de cumplir con funciones específicas de diferente manera, como provisión de hábitat o la construcción de diferentes estructuras morfológicas, si se pierde una especie dentro de la comunidad como respuesta a algún tipo de perturbación, la funcionalidad del sistema arrecifal se verá modificada. Esto se ha observado en el Caribe, en donde se ha reportado un decremento en la cobertura coralina y un cambio en la composición de la comunidad coralina en donde las especies oportunistas se han visto favorecidas por encima de las especies clave en la construcción arrecifal (Gardner *et al.*, 2003; Álvarez-Filip *et al.*, 2009; 2011; 2013; González-Barrios *et al.*, 2021). En el caso del Pacífico Oriental Tropical (POT), donde por efecto del Cambio Climático los corales ramificados disminuirán su cobertura, se podría esperar un remplazo por corales de morfología masiva, los cuales resultan ser más tolerantes a la combinación de la acidificación oceánica y al cambio climático (Manzello, 2010; Manzello *et al.*, 2017; Cabral-Tena *et al.*, 2018). Sin embargo, recientemente se ha reportado que los arrecifes coralinos del POT han desarrollado una mayor resistencia o tolerancia térmica, tanto a las altas como a las bajas temperaturas anómalas, permitiendo que se recuperen en un tiempo de 10 a 15 años (Romero-Torres *et al.*, 2020). Cabe señalar que existe una importante disparidad en la tasa de recuperación a las perturbaciones de las diferentes especies de coral, por lo que los cambios en la estructura comunitaria de los arrecifes pueden comprometer su funcionalidad física (Figueroa-Camacho & Nava, 2015; González-Barrios *et al.*, 2021).

Las perturbaciones han causado la degradación de los arrecifes coralinos en distintas partes del mundo (Souter *et al.*, 2021), desencadenando la disminución de los corales constructores de arrecifes como los

principales ocupantes del espacio arrecifal y/o el recambio en la composición de especies dominantes del sistema (Norström *et al.*, 2009). Una perturbación es un evento aleatorio que altera el ecosistema o la estructura de la comunidad, cambiando los recursos disponibles o el entorno físico. En este contexto, si una perturbación afecta a los organismos bioingenieros de una comunidad, como los corales escleractinios, puede tener un impacto negativo en los procesos autoorganizativos del ecosistema. (White & Pickett, 1985).

Una de las formas de hacer frente la problemática de la degradación arrecifal son los programas de restauración. Se ha definido a la restauración como la intervención que ayuda a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, teniendo como objetivo principal establecer poblaciones autosuficientes para continuar su desarrollo sin asistencia o subsidio adicional (Bayraktarov *et al.*, 2020; Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Existen dos tipos de restauración: a) la pasiva, actualmente también denominada proactiva (Hein *et al.*, 2021), donde los ecosistemas se recuperan naturalmente al eliminar los factores causales de la degradación, por lo general se utiliza en ambientes con daños menores; b) la restauración activa, denominada también reactiva (Hein *et al.*, 2021), que se basa en reintroducciones o enriquecimiento (adición) de individuos, promoviendo los procesos de recuperación. Este tipo de restauración se utiliza más en ambientes donde la recuperación natural no asistida es poco probable (Boström-Einarsson *et al.*, 2020; Westoby *et al.*, 2020). En el caso de los arrecifes coralinos, se requieren de ambos tipos de restauración y, particularmente, acciones de restauración activa que permitan recuperar su estructura y con ello, sus funciones geo-ecológicas (Vaughan, 2021).

Una de las técnicas de restauración activa es la propagación directa de fragmentos de coral. En general, se utilizan corales de oportunidad, es decir, fragmentos de corales que se desprenden de la colonia naturalmente mediante procesos de bioturbación, corrientes o tormentas (Monty *et al.*, 2006). Se pueden utilizar diversas especies que cumplan funciones clave (e.g. construcción de arrecifes, aprovisionamiento de hábitat), lo que permite recuperar el ecosistema o incluso, una parte de este, centrándose en un grupo específico de especies (Figueroa-Camacho & Nava, 2015).

Además de implementar una técnica, cada programa de restauración debe de tener un componente de evaluación o monitoreo: a) a corto plazo (un año) en términos de diseño y ejecución de la fase inicial de la restauración, i.e. la efectividad de los métodos del trasplante; b) a mediano plazo (1-5 años) analizando el cumplimiento de los objetivos planteados, en términos de supervivencia, abundancia, baja prevalencia de enfermedades, etc.; c) a largo plazo (≥ 5 años): considerando información una vez que los trasplantes hayan tenido tiempo de asentarse, crecer y tener un impacto en el paisaje arrecifal en términos de reproducción

sexual, valor ecológico del arrecife y funcionalidad del ecosistema (Goergen *et al.*, 2020). Se ha evidenciado que existen desajustes en los objetivos y las métricas utilizadas durante el seguimiento del proceso de restauración. Por ejemplo, en ciertos programas de restauración donde el objetivo es restaurar la función ecológica del arrecife, el monitoreo está centrado en la toma de métricas de fragmentos individuales de coral. Estos desajustes impiden que se realice una evaluación de los resultados de los proyectos y, por lo tanto, de su eficacia (Hein *et al.*, 2017; Boström-Einarsson *et al.*, 2020). La mayoría de los proyectos de restauración utilizan parámetros biológicos (crecimiento y supervivencia) o el cambio en la cobertura de coral vivo (%), para evaluar el éxito y efectividad. No obstante, pocos se han enfocado en medir su efecto en términos ecológicos (Boström-Einarsson *et al.*, 2020; Rinkevich, 2020). Por lo anterior, una manera holística de evaluar la eficacia de un programa de restauración sería utilizando un enfoque funcional.

Los arrecifes y comunidades coralinas del Pacífico Tropical mexicano (PTM) están conformadas por ensamblajes relativamente similares con representación de los géneros *Pocillopora*, *Porites*, *Psammocora* y *Pavona* (Reyes-Bonilla *et al.*, 2005). Se caracterizan por ser comunidades pequeñas, de distribución discontinua y con baja diversidad de especies (López-Pérez *et al.*, 2012; Manzello *et al.*, 2017), en donde *Pocillopora spp.* es el principal constructor arrecifal produciendo $\geq 90\%$ de la producción total de CaCO_3 como resultado de su rápido crecimiento y alta densidad esquelética (Cabral-Tena *et al.*, 2018; Robles-Payán *et al.*, 2021).

Dentro del PTM se encuentran las comunidades coralinas del Parque Nacional Islas Marietas (PNIM), que constituyen uno de los sitios con mayor diversidad coralina dentro del Pacífico Central Mexicano (PCM) (Cupul-Magaña *et al.*, 2000). Sin embargo, estas comunidades coralinas se han degradado como resultado de la presión de distintos estresores. El fenómeno El Niño de 1997-1998, ocasionó la mortandad y pérdida de más del 90% de la cobertura coralina en el PCM (Carriquiry *et al.*, 2001). Posteriormente, se observó que los corales de la zona presentaban patrones de recuperación que permiten que los sistemas persistan bajo condiciones de estrés (Romero-Torres *et al.*, 2020). A pesar de ello, los estresores como el incremento excesivo del turismo que en 2015 alcanzó más de 322,000 visitantes (datos proporcionados por CONANP, 2007), han ocasionado que la recuperación natural del arrecife se ralentice debido a la presión que ejerce sobre el ecosistema (Cupul-Magaña & Rodríguez-Troncoso, 2017).

La preocupación que genera la pérdida del ecosistema arrecifal del PNIM ha llevado a que se realicen distintos esfuerzos de manejo que permitan su recuperación (Tortolero-Langarica *et al.*, 2019), siendo uno de ellos el programa de restauración coralina que comenzó con pruebas preliminares en 2013, pero que oficialmente inició en 2014 y continúa hasta la fecha. Bajo este contexto, el análisis de los cambios de la

FF asociados con los esfuerzos de restauración permitirá evaluar la eficiencia de dicho programa. Lo que resulta en una herramienta que permite evaluar el nivel de degradación o recuperación en el que se encuentran los arrecifes y, de esta manera, obtener información que permita apoyar la toma de decisiones asertivas respecto al manejo del ecosistema.

1.1 Antecedentes

La restauración activa es una herramienta para mitigar la degradación arrecifal. En este contexto, se debe elegir el método que resulte más eficiente. Entre las técnicas de restauración coralina más antiguas se encuentra el trasplante directo, que ha demostrado un éxito promedio de supervivencia del 64%. No obstante, de 94 estudios analizados, se reportó que el 20% alcanzó un éxito de supervivencia superior al 90%, por lo que se considera uno de los métodos más efectivos. Este enfoque de restauración involucra principalmente corales de rápido crecimiento, utilizando en su mayoría corales de tipo ramificado (Bayraktarov *et al.*, 2020).

Específicamente, en el PNIM, Tortolero-Langarica *et al.* (2014; 2019) identificaron que la técnica de trasplante directo utilizando “fragmentos de oportunidad” de corales ramificados es la más adecuada para preservar las poblaciones coralinas del PNIM. Después, los autores implementaron a largo plazo (2013-2018), el protocolo. Con base en los resultados determinaron que el programa de restauración utilizando la fragmentación natural de corales ramificados y en sustrato natural era exitoso puesto que, a largo plazo, la cobertura de coral vivo aumentó más del 4 % por año con una producción de carbonato de calcio acumulada de $\sim 3 \text{ kg CaCO}_3\text{m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Concluyeron que, si bien el programa brinda esperanza en la recuperación coralina, es imprescindible que los esfuerzos de evaluación continúen, para comprender completamente las estrategias de restauración y conservación de este ecosistema.

A la fecha, no se ha utilizado el enfoque de la Ecología Funcional, específicamente de la funcionalidad física arrecifal, como métrica para evaluar el programa a largo plazo debido, probablemente a que el Índice de Función Arrecifal (IFA), es relativamente nuevo. González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), desarrollaron el IFA a partir de un enfoque basado en la morfología, tasa de calcificación y complejidad funcional como atributos para medir la funcionalidad de las especies coralinas y su aporte a la construcción del arrecife. Determinaron que el funcionamiento del arrecife aumenta con la cobertura de coral, pero la magnitud del aumento funcional depende de la composición y los patrones de dominancia de los grupos de corales clave del arrecife, concluyendo que el IFA se puede implementar para complementar indicadores comúnmente

empleados (p. ej. cobertura coralina), durante la evaluación de la condición de los arrecifes. Por ejemplo, González-Barríos *et al.* (2021), estimaron los cambios temporales de FF a través del IFA y la cobertura coralina en distintas áreas del Caribe mexicano que se han degradado debido a distintos estresores. Observaron que la FF arrecifal de las diferentes zonas dependía de la identidad de las especies que estaban dominando. Los autores describieron que la cobertura coralina y la FF de los arrecifes aumentó a diferentes ritmos, la cobertura coralina un 2% por año, mientras que la FF aumentó solo un 0.6% anualmente, demostrando que no es lo mismo hablar en términos de cobertura coralina y FF cuando se está evaluando el estado en el que se encuentran los arrecifes coralinos, pudiendo subestimar la recuperación si sólo se toma en cuenta el aumento en la cobertura coralina.

Recientemente se realizó un estudio que demuestra que dicho índice puede ser utilizado como métrica para medir la funcionalidad arrecifal de los arrecifes del POT. Cabral-Tena *et al.* (2020), muestrearon arrecifes de Huatulco, Oaxaca, con la finalidad de explorar su potencial funcional con base en el IFA. Los autores describieron que en el Pacífico Sur mexicano existen tres grupos funcionales de corales escleractinios: los conformados por los corales del género *Pocillopora*, los del género *Pavona* y el grupo conformado por *Porites panamensis*, siendo el grupo funcional de los pocilopóridos los que contribuyen mayormente al funcionamiento físico de los arrecifes. Así mismo, el enfoque funcional les permitió describir que, la FF estaba cerca de alcanzar su máximo potencial funcional (96%) cuando la abundancia relativa de pocilopóridos era $\geq 60\%$, disminuyendo conforme aumentaba la abundancia de los otros grupos funcionales. Cabe señalar que los autores resaltan la vulnerabilidad de estos arrecifes, puesto que los corales ramificados son más susceptibles a las perturbaciones en comparación con los masivos y de crecimiento lento. Concluyeron que el futuro de los arrecifes del POT depende tanto de la supervivencia de los pocilopóridos, como de la capacidad de las comunidades coralinas de soportar condiciones oceanográficas altamente variables.

La relación que existe entre la composición de la comunidad coralina en términos de grupos morfofuncionales y el potencial que tienen los arrecifes coralinos para mantener su funcionamiento físico está bien estudiada. Estrada-Saldívar *et al.* (2019), evaluaron los cambios en la comunidad de corales escleractinios con respecto a la forma y función de la colonia (ramificados, digitiformes, foliosos, masivos y oportunistas), entre 1985 y 2016 en el Caribe mexicano. Los autores encontraron que, después de 31 años se perdió en casi todas las zonas la dominancia de los corales ramificados, lo que ocasionó una homogenización ecológica a lo largo del arrecife con un aumento de corales oportunistas, es decir, aquellas formas con baja complejidad estructural y bajas tasas de calcificación. Dicha homogenización,

compromete la estructura de los arrecifes existentes y, por lo tanto, su capacidad para sostener la biodiversidad asociada y las funciones geoecológicas que brindan.

En consecuencia, utilizar el IFA como métrica para evaluar el estado de las comunidades coralinas en el PNIM, a partir de los esfuerzos de restauración activa realizados, resulta relevante debido a que proporciona una visión más integral y completa de la efectividad de las acciones de restauración. Además, permite una mejor toma de decisiones en cuanto al manejo del área. Lo cual no solo promueve una recuperación efectiva de los arrecifes, sino que también fomenta la protección y preservación a largo plazo del ecosistema coralino.

1.2 Justificación

Las comunidades coralinas del PNIM son de gran importancia dado que albergan la mayor diversidad íctica y coralina del Pacífico Central mexicano (PCM) además, se ha reportado que las comunidades coralinas de Islas Marietas actúan como una importante zona de dispersión larvaria para toda la bahía, ayudando a colonizar zonas degradadas (Cupul-Magaña *et al.*, 2000; Pérez de-Silva *et al.*, 2022). Al igual que el resto de los sitios arrecifales el PNIM ha perdido cobertura de coral vivo debido a estresores tanto globales como locales. Un síntoma de esta degradación fue la disminución del 4% en la cobertura coralina en menos de un año (2012-2013) por lo que en 2014 se inició un programa de restauración coralina que continúa hasta la fecha (Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023a). Así mismo, la degradación afecta también la funcionalidad física arrecifal (FF), lo cual puede tener como consecuencia la pérdida de biodiversidad y funciones geoecológicas asociadas a este ecosistema. Analizar los cambios de FF a partir de la implementación de dicho programa permite evaluar la recuperación del sistema arrecifal desde una perspectiva funcional a largo plazo y, de esta manera, reconocer si las funciones del arrecife se están rehabilitando. Lo que resulta en una herramienta que permite reconocer el nivel de degradación o recuperación en el que se encuentran los arrecifes y con ello, obtener información que permita apoyar la toma de decisiones respecto al manejo del ecosistema.

1.3 Hipótesis

Dado que la funcionalidad física arrecifal de una zona depende de la composición y estructura de la comunidad de corales escleractinios donde las especies ramificadas son las que más aportan a dicha

funcionalidad, entonces, derivado de las acciones de manejo del Área Natural Protegida como en la restauración activa, en las que se trasplantaron fragmentos de corales ramificados, se espera que los transectos restaurados tengan un incremento significativamente mayor en la funcionalidad física en comparación con los no restaurados (Figura 1).

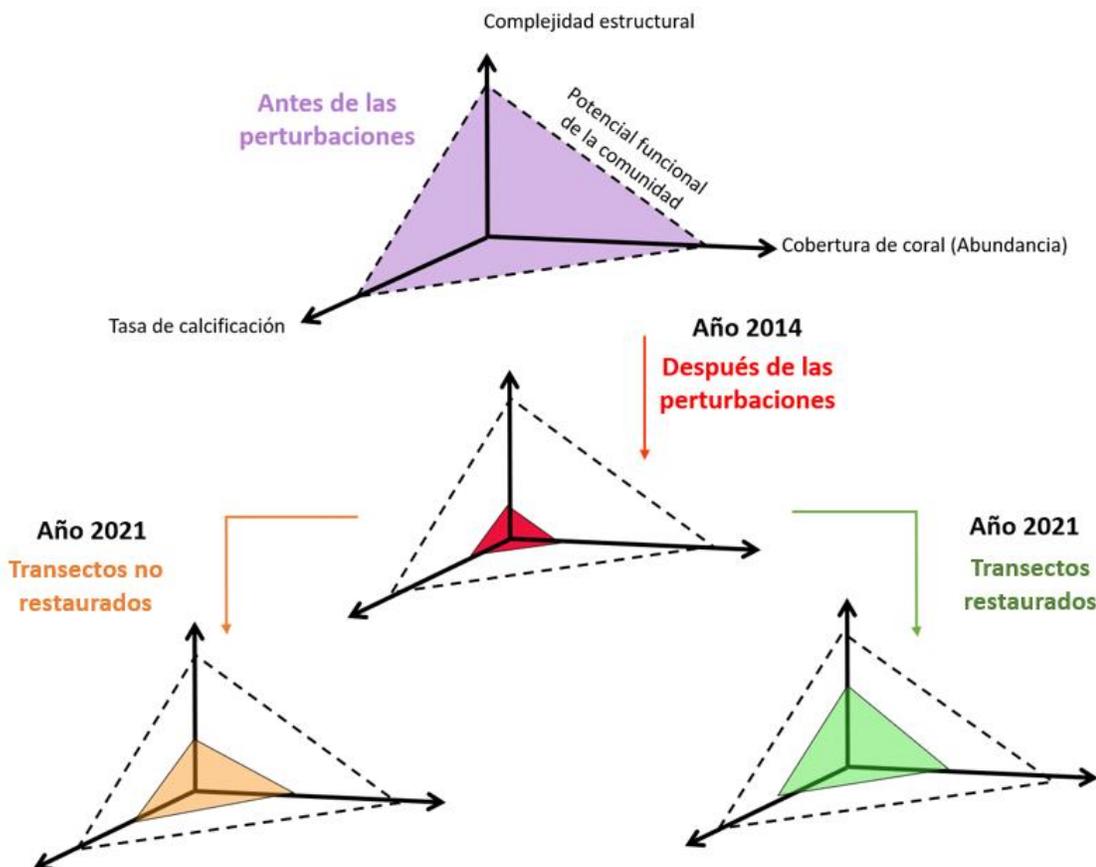


Figura 1. Representación gráfica de la hipótesis de este estudio. Se observa la diferencia en la recuperación del potencial funcional de los arrecifes del PNIM entre los transectos restaurados y los no restaurados en el año 2021 (después del inicio del programa de restauración, 2014). La funcionalidad física (FF) de las zonas restauradas muestra un incremento significativamente mayor en la FF en comparación con las zonas no restauradas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar los cambios en la funcionalidad física a partir de los esfuerzos de restauración activa llevados a cabo en las comunidades coralinas del Parque Nacional Islas Marietas durante 2014-2021.

1.4.2 Objetivos específicos

Determinar la funcionalidad física ha cambiado a lo largo del tiempo de restauración.

Analizar si existen diferencias en el incremento de la funcionalidad física entre los transectos restaurados y los no restaurados.

Determinar el género de coral con mayor aporte en la funcionalidad física.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

El programa de restauración arrecifal se llevó a cabo en seis sitios del PNIM, ubicado en el municipio de Bahía Banderas, Nayarit ($20^{\circ}40'35''$ - $20^{\circ}41'45''$ N, $105^{\circ}33'30''$ - $105^{\circ}38'10''$ O; Figura 2).

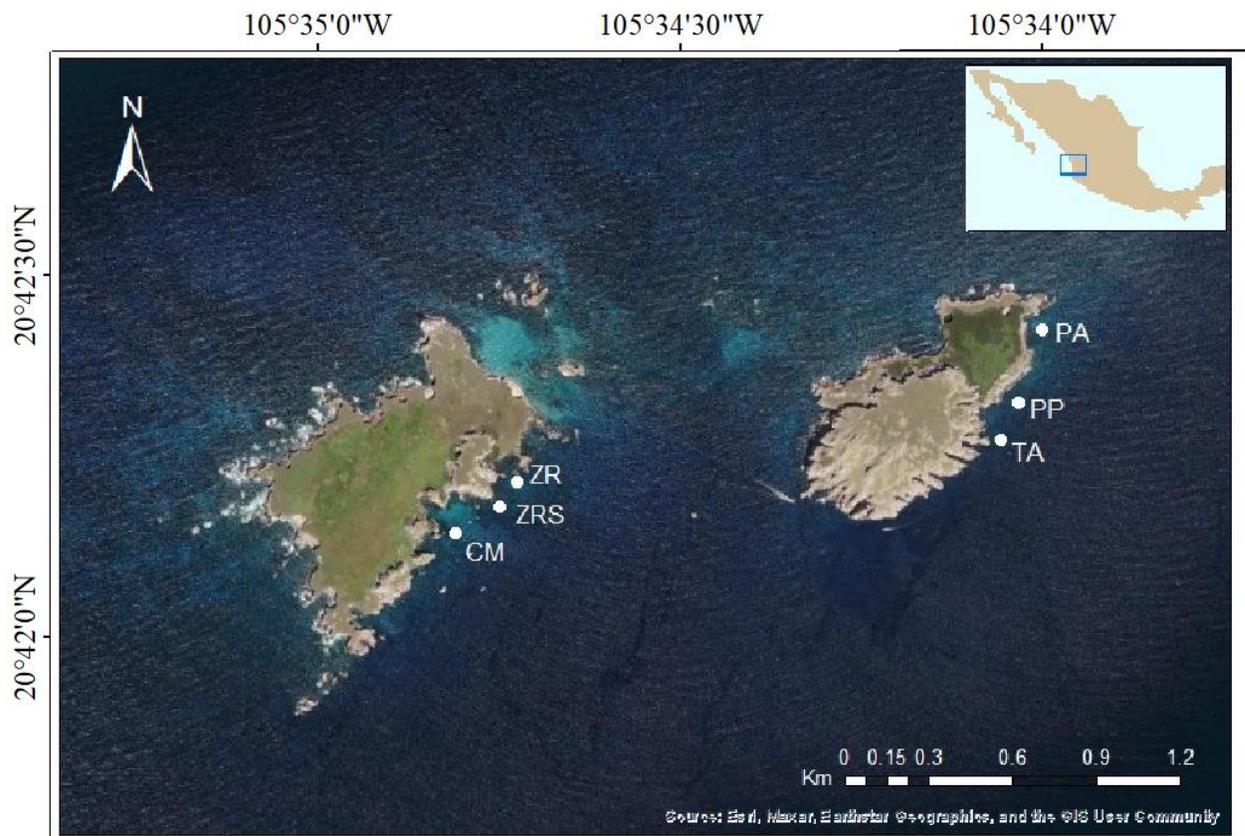


Figura 2. Mapa del área de estudio y los sitios de muestreo: Isla Larga (IL); Zona de Restauración (ZR), Zona de Restauración Sur (ZRS; Cueva del Muerto (CM); Isla Redonda (IR); Playa del Amor (PA); Plataforma Pavonas (PP); y, Túnel Amarradero (TA) (Modificado de Muñoz-Alfaro *et al.*, en prensa).

El PNIM se localiza en la zona de confluencia de tres corrientes oceánicas: la Corriente de California que aporta aguas frías y ricas en nutrientes, la Corriente Costera Mexicana de aguas cálidas y bajas en nutrientes y la del Golfo de California, que proporciona aguas cálidas y con alta salinidad, lo que ocasiona importantes variaciones en la temperatura de la superficie del mar (SST) (con un rango de 22.2 - 34.4°C) y transparencia del agua (3.3 a 6.8 m con el disco de Secchi) (Kessler, 2006; CONANP, 2007; Palacios-Hernández *et al.*, 2010). El área es influenciada por anomalías térmicas decadales e interanuales como

ENOS (El Niño-Oscilación del Sur), con su fase de El Niño (anomalías de $\geq 3^{\circ}\text{C}$) y la Niña con anomalías térmicas de $\leq 4^{\circ}\text{C}$ (CONANP, 2007; Palacios-Hernández *et al.*, 2010), las cuales han provocado eventos de blanqueamiento y en algunos casos mortandad (Cruz-García *et al.* 2020).

El PNIM está conformado por dos islas volcánicas: Isla Larga e Isla Redonda, separadas por un canal de agua de un kilómetro, así como por dos islotes cercanos a Isla Larga. De los seis sitios de restauración, tres se encuentran en Isla Larga: Zona de Restauración (ZR), Zona de Restauración Sur (ZRS) y Cueva del Muerto (CM); y tres sitios en Isla Redonda: Plataforma Pavonas (PP), Túnel Amarradero (TA) y Playa del Amor (PA) (Figura 2). Isla Larga la que presenta mayor cobertura de corales pétreos respecto a Isla Redonda. Estas comunidades están dominadas en aguas poco profundas (3-10 m) por corales ramificados del género *Pocillopora* y en aguas más profundas (11-20 m) por especies masivas de los géneros *Porites* y *Pavona* (CONANP, 2007; Hernández-Zulueta *et al.*, 2017).

2.2 Trabajo de campo

2.2.1 Restauración

Se seleccionaron los sitios de restauración con base en la cobertura coralina, la disponibilidad de colonias fragmentadas y el sustrato natural disponible para la fijación de fragmentos (roca, matriz arrecifal o colonias de muerte reciente). En cada uno de los sitios se recolectaron fragmentos de oportunidad del género *Pocillopora*. Cada uno de los fragmentos se revisó *in situ* cuidado que no tuvieran signos de blanqueamiento, tejido muerto o mínima presencia de esponjas u organismos bioerosionadores (Tortolero-Langarica *et al.*, 2014; 2019;2020).

Los fragmentos coralinos obtenidos se sembraron dentro de la misma área de recolección, adhiriéndolos al sustrato con ayuda de cinchos de plástico. Cabe señalar que, el proceso de siembra se realizó con base en la composición bentónica de cada sitio, es decir, sobre matriz de coral muerto estable o rocas con cavidades sobre las que se pueden adherir los fragmentos coralinos, se realizaron transectos lineales de 25m y se sembraron los fragmentos a un metro de cada lado a lo largo del transecto. Es importante mencionar que la cantidad de fragmentos sembrados anualmente varió debido a la naturaleza propia del programa de restauración (Tortolero-Langarica *et al.*, 2014; 2019;2020; Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023a).

2.2.2 Monitoreo

Para evaluar el efecto de la restauración en la cobertura de coral (CC), el periodo de monitoreo se dividió en tres temporadas anuales: durante los meses de febrero-abril, de mayo a julio, y la temporada de agosto a enero, durante 2014-2021. Se estimó la CC (%) utilizando el método de transectos de banda. En cada sitio se colocaron cinco transectos semipermanentes de 25 m paralelos a la línea de costa. El porcentaje de CC se registró utilizando seis cuadrantes de 1 m² por transecto, colocados a una distancia de ~4 m. Se obtuvo el promedio por transecto que corresponde a la unidad experimental de este estudio. En cada sitio, se diferenció entre áreas en donde se realizó restauración (transectos restaurados; R) y aquellas donde no se restauró (transectos no restaurados; NR). En cada uno de los sitios, las especies de corales fueron identificadas en función de los rasgos morfológicos utilizando descripciones taxonómicas (Veron *et al.*, 2022). Además, de forma aleatoria, a lo largo de los transectos por especie se seleccionaron 15 colonias coralinas en cada sitio. A cada colonia se le midió individualmente su diámetro (máximo y mínimo), la altura y la distancia lineal a lo largo del eje máximo de la colonia, así como la longitud del contorno desde el principio hasta el final de la colonia, con ayuda de una cadena de bola No. 9 (2-3 mm).

2.3 Trabajo de gabinete

2.3.1 Índice de Función Arrecifal (IFA)

El índice considera tres variables: la abundancia específica entendida a través del cálculo de la cobertura coralina, la tasa de calcificación específica y la complejidad estructural específica (González-Barrios *et al.*, 2021).

Los datos para el cálculo de la cobertura coralina absoluta se obtuvieron directamente de los monitoreos realizados por sitio durante 2014-2021. Para la tasa de calcificación (kg m⁻² año⁻¹), se consideró la morfología de cada especie coralina, siguiendo el método propuesto por González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), para lo cual se consideraron los datos previamente registrados en el área de estudio de extensión (cm año⁻¹) y la densidad esquelética de cada especie (g cm⁻³) (Tortolero-Langarica *et al.*, 2016; 2017) (Tabla 1).

Tabla 1. Tasa de calcificación, índice de rugosidad, altura promedio y coeficiente funcional para cada una de las especies coralinas del PNIM. DE = Desviación estándar; CF = Coeficiente funcional.

Especies	Tasa de calcificación (kg CaCO ₃ m ⁻² año ⁻¹)	Índice de rugosidad	DE	Altura (cm)	DE	CF
<i>Porites panamensis</i>	3.66	1.59	0.29	9	5	0.01
<i>Pocillopora damicornis</i>	24.97	3.43	0.24	23	0	0.57
<i>Pocillopora verrucosa</i>	25.70	5.13	2.00	17	9	0.67
<i>Pocillopora capitata</i>	23.28	5.41	0.93	21	7	0.68
<i>Pocillopora eydouxi</i>	25.44	5.75	0.95	21	7	0.74
<i>Pocillopora effusus</i>	24.85	4.93	1.03	20	5	0.66
<i>Pocillopora meandrina</i>	12.59	3.86	1.51	21	0.10	0.40
<i>Pavona gigantea</i>	8.50	2.30	0.47	59	32	0.47
<i>Pavona clavus</i>	12.79	1.88	0.47	25	10	0.28

Así mismo, la complejidad estructural se determinó con base en el índice de rugosidad (IR) a nivel de colonia, el cual considera la relación entre el contorno, la distancia lineal del eje más largo de la colonia y la altura máxima de la colonia (Álvarez-Filip *et al.*, 2009). Siguiendo el método planteado por González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), la tasa de calcificación, la rugosidad y la altura máxima de la colonia se estandarizaron para obtener valores en un rango de 0-1 debido a la diferencia de escalas de medición y con la finalidad de facilitar la interpretación de los datos, con base en la siguiente fórmula, donde x es el valor de cada una de las variables:

$$Y = \frac{(x - \text{valor mínimo})}{\text{valor máximo} - \text{valor mínimo}} \quad (1)$$

Para calcular el IFA (González-Barrios & Álvarez-Filip, 2018), se obtuvo el coeficiente funcional (CF) por especie, el cual se calcula promediando las variables estandarizadas (tasa de calcificación, rugosidad y altura de la colonia). Posteriormente, el IFA se calculó con la sumatoria del producto de la CC de cada especie presente en el sitio (expresada como porcentaje), por su respectivo valor de CF para cada sitio y año:

$$IFA = \sum i \left(\frac{CCi}{100} \right) CFi \quad (1)$$

Para facilitar la interpretación de los datos, y con base en el método propuesto por González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), se calculó la raíz cuarta de los IFA, obteniendo valores entre 0 y 1, donde los cercanos a 0 representan sitios con baja funcionalidad arrecifal y valores cercanos a 1 sitios con alta funcionalidad.

2.3.2 Análisis de datos

Primeramente, con la finalidad de tener un panorama más completo de lo que está sucediendo con la funcionalidad física a partir de los esfuerzos de restauración, cada prueba estadística se realizó a diferentes escalas espaciales. Para ello, tomando en cuenta la distinción entre los transectos R y los NR, los datos tanto de CC como los datos de IFA, se promediaron en tres diferentes escalas espaciales: a nivel Parque (PNIM), nivel islas (Isla Larga e Isla Redonda) y nivel sitios (ZR, ZRS, CM, PA, PP y TA), por lo que cabe señalar, que todos los análisis se realizaron utilizando los promedios.

Con la finalidad de determinar si la FF tenía una tendencia a lo largo del tiempo de restauración, se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables CC e IFA en el tiempo, entre 2014 y 2021, cabe señalar que puesto que lo que se buscaba era ver una tendencia, las correlaciones se realizaron utilizando año 1, año 2, año 3, etc., como equivalentes de los años 2014, 2015, 2016, etc. Posteriormente, se compararon los coeficientes de correlación obtenidos para ambas condiciones de estudio (R y NR), utilizando la transformación r-a-z de Fisher, con base en Lenhard & Lenhard (2014).

Por otro lado, se calculó la tasa de cambio 2014-2021 tanto de la CC como del IFA para cada uno de los casos (R y NR; escalas espaciales), entendiendo esta tasa de cambio como el porcentaje de incremento o decremento de cada una de las variables (CC e IFA) del 2014 al 2021. Así mismo, para analizar las diferencias en el incremento de la FF entre los transectos R y los NR, se realizaron pruebas T de Student para comparar las medias tanto de CC como de IFA entre R y NR. Respecto a los supuestos que exige la prueba, con base en el Teorema del Límite Central (TLC) y debido a que se utilizaron promedios, se asumió el supuesto de normalidad, así mismo, puesto que el paquete estadístico Past4.02 utiliza una varianza ponderada para realizar la prueba de significancia, el supuesto de homocedasticidad también se cumple.

Finalmente, para determinar el género de coral con mayor aporte en la funcionalidad física, se realizaron correlaciones entre el IFA y los diferentes géneros coralinos reportados. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando los paquetes estadísticos Statistica 7 y Past4.02.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Funcionalidad física a través del tiempo

En los tres niveles de análisis espacial (PNIM, islas y sitios) se observó un incremento tanto en la CC, como en el IFA desde el año 2014 al 2021. El análisis realizado de las correlaciones a través del tiempo y las CC e IFA por año, mostraron que en 29 de 36 casos (80.56%), hay una tendencia positiva y que a lo largo del tiempo aumentan la CC y el IFA en transectos tanto restaurados como no restaurados (Tablas 1-3).

Respecto al cambio en la CC a través del tiempo, el 83.33% de las correlaciones (CC y tiempo) fueron significativas ($p < 0.05$) y positivas, con un índice de correlación mayor a $r=0.70$. En general, las correlaciones significativas más altas se encontraron en los transectos R en comparación con los NR. La correlación a nivel del PNIM fue de $r=0.94$ en los transectos R, mientras que en los NR fue de $r=0.85$ (Tabla 1). De igual manera, a nivel de islas, tanto Isla Larga como Isla Redonda presentaron mayor correlación en los transectos R ($r=0.93$ y $r=0.88$ respectivamente), siendo IL la que presentó la correlación más alta a nivel de islas (Tabla 1).

No hubo correlaciones significativas ($p > 0.05$) entre la CC y el tiempo a nivel de sitios en los transectos NR de los sitios Zona de Restauración, Playa del Amor y Túnel Amarradero, además en Túnel Amarradero la correlación fue negativa ($r = -0.42$) (Tablas 2 y 3).

En general, las correlaciones significativas más altas se encontraron en los transectos R en comparación con los NR, a excepción del sitio Cueva del Muerto ($R = 0.83$, $NR = 0.84$), el sitio que mostró una menor correlación fue Túnel Amarradero (0.81 , en los transectos R), mientras que Zona de Restauración Sur fue el que presentó mayor correlación (0.93 en los transectos R) (Tablas 2 y 3).

Se encontró una diferencia significativa ($p < 0.005$) entre el incremento de la CC promedio a través del tiempo entre los transectos R y NR en los tres niveles de estudio; a nivel de islas, en Isla Redonda y; a nivel de sitios en Zona de Restauración, Túnel Amarradero y Playa del Amor (Tablas 1-3), siendo en los transectos R en donde se encontró mayor correlación e incremento.

En cuanto al cambio en el IFA a través del tiempo, se observó un comportamiento similar al de la CC. El 77.78% de las correlaciones fueron significativas ($p < 0.05$) y positivas. En general tuvieron índices de

correlación ≥ 0.80 , a excepción de Túnel Amarradero, que presentó una correlación significativa en los transectos R de $r= 0.72$ (Tablas 4-6). Sin embargo, a diferencia de la CC, las correlaciones significativas más altas, en cada uno de los niveles, no correspondieron solamente a los transectos restaurados.

El PNIM mostró mayor correlación en los transectos R ($r= 0.98$) (Tabla 4); a nivel de islas, Isla Redonda presentó la mayor correlación ($r= 0.99$ en los transectos R), sin embargo, en Isla Larga los transectos NR presentaron mayor correlación que los R ($R = 0.92$, $NR = 0.94$) (Tabla 4); a nivel de sitios, Plataforma Pavonas mostró la mayor correlación ($r= 0.97$ en los transectos R), mientras que Túnel Amarradero presentó la menor correlación ($r= 0.72$ en los transectos R), los sitios Cueva del Muerto y Zona de Restauración Sur presentaron correlaciones más altas en los transectos NR (Tablas 5 y 6).

Al comparar el comportamiento del incremento del IFA promedio entre los transectos R y NR en cada uno de los niveles espaciales del análisis, se encontraron diferencias significativas en los tres niveles de estudio ($p < 0.005$); a nivel de islas, en Isla Redonda y; a nivel de sitios, en Zona de Restauración, Túnel Amarradero y Plataforma Pavonas (Tablas 4-6), siendo en los transectos R, donde se encontró mayor correlación e incremento de IFA.

Cabe mencionar que durante los años 2016-2018 se observó un decremento en la trayectoria de la CC promedio, el cual es más notable en los transectos NR, respecto a los transectos R. Sin embargo, dicho decremento no se ve reflejado de manera notoria en la trayectoria del IFA promedio

Tabla 2. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, de las escalas espaciales parque e islas. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.

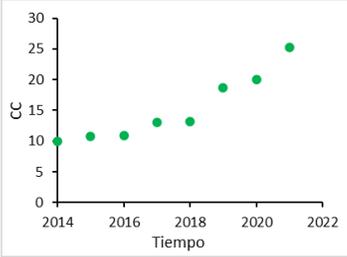
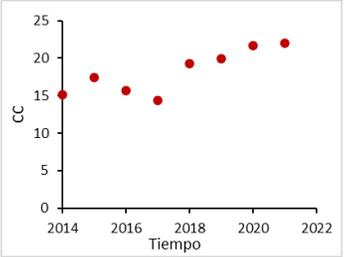
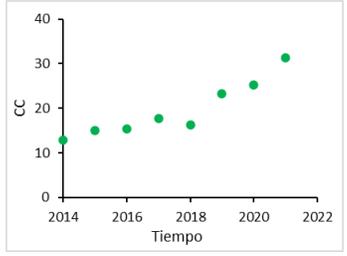
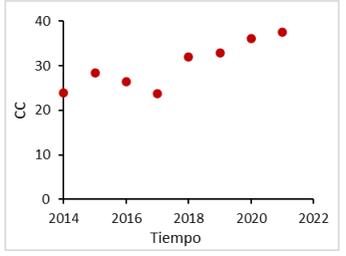
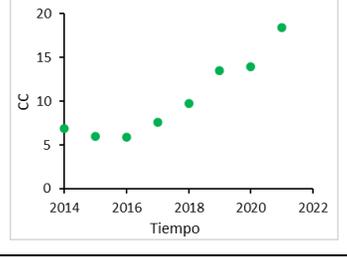
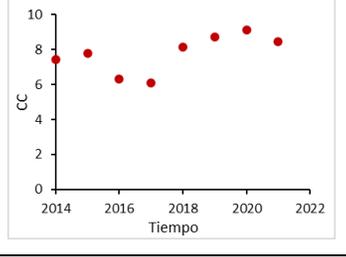
CC			
Escala espacial de estudio	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
PNIM	<p>$r = 0.94, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.85, p < 0.05$</p> 	$p < 0.001$
Isla Larga	<p>$r = 0.93, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.88, p < 0.05$</p> 	$p > 0.05$
Isla Redonda	<p>$r = 0.92, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.74, p < 0.05$</p> 	$p < 0.001$

Tabla 3. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.

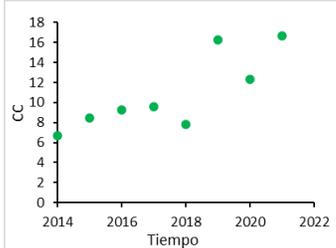
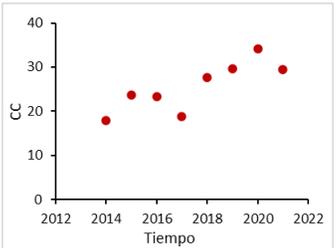
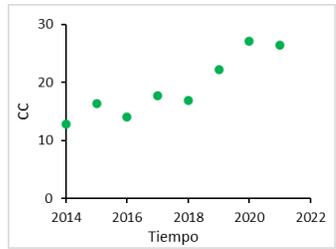
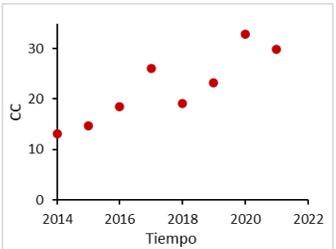
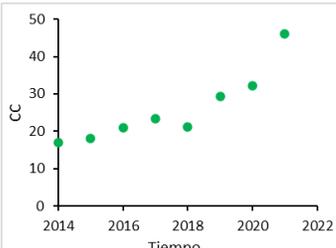
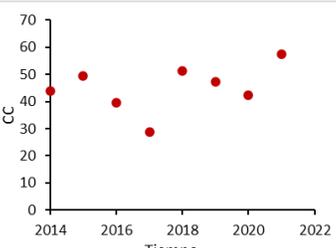
CC			
Sitios	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
Cueva del Muerto	<p>$r = 0.83, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.84, p < 0.05$</p> 	$p > 0.05$
Zona de Restauración Sur	<p>$r = 0.93, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.89, p < 0.05$</p> 	$p > 0.05$
Zona de Restauración	<p>$r = 0.90, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.36, p > 0.05$</p> 	$p < 0.001$

Tabla 4. Correlaciones entre la cobertura coralina (CC) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher (Continuación de la tabla 2).

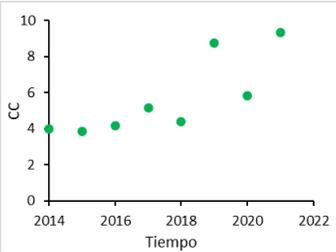
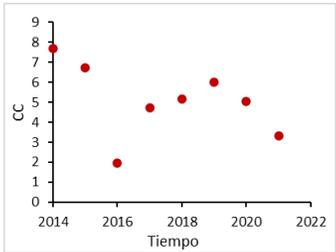
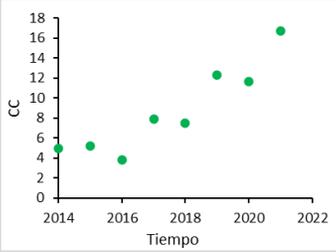
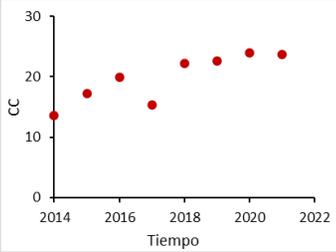
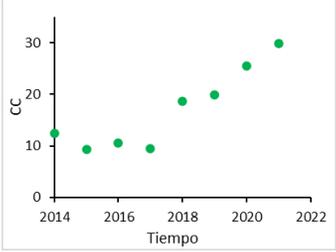
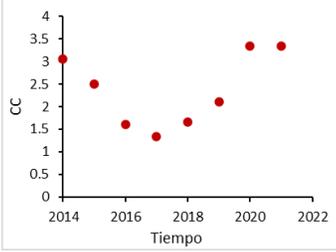
CC			
Sitios	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
Túnel Amarradero	<p>$r = 0.81, p < 0.05$</p> 	<p>$r = -0.42, p > 0.05$</p> 	$p < 0.001$
Plataforma Pavonas	<p>$r = 0.92, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.87, p < 0.05$</p> 	$p > 0.05$
Playa del Amor	<p>$r = 0.89, p < 0.05$</p> 	<p>$r = 0.29, p > 0.05$</p> 	$p < 0.05$

Tabla 5. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo para las escalas espaciales parque e islas. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.

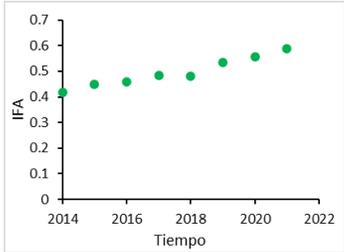
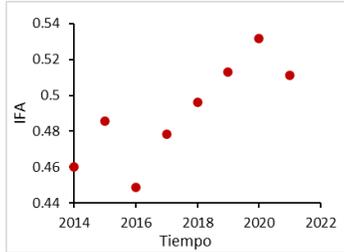
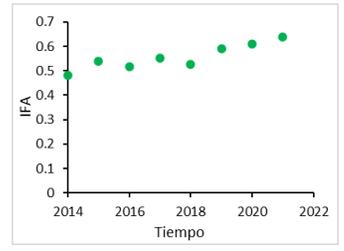
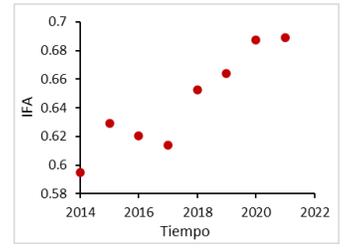
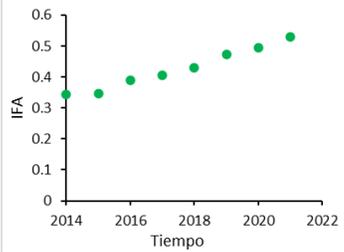
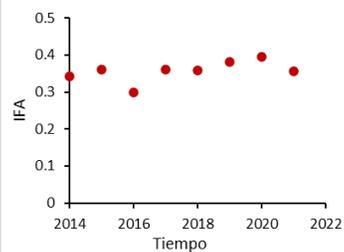
IFA			
Escala espacial de estudio	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
PNIM	$r = 0.98, p < 0.05$ 	$r = 0.83, p < 0.05$ 	$p < 0.001$
Isla Larga	$r = 0.92, p < 0.05$ 	$r = 0.94, p < 0.05$ 	$p > 0.05$
Isla Redonda	$r = 0.99, p < 0.05$ 	$r = 0.74, p > 0.52$ 	$p < 0.001$

Tabla 6. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher.

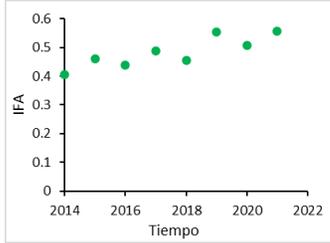
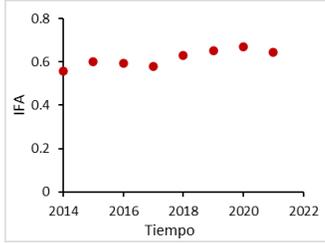
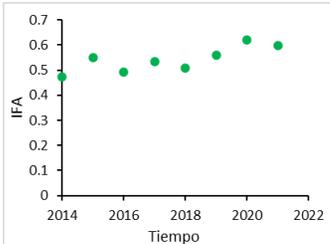
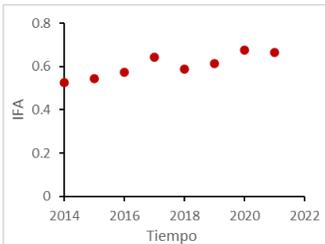
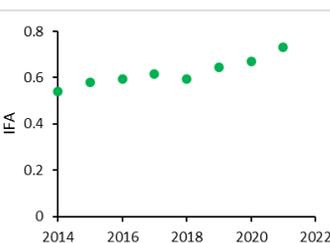
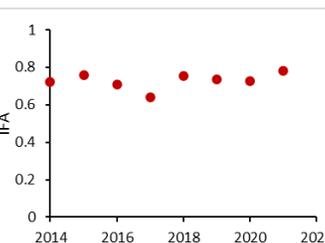
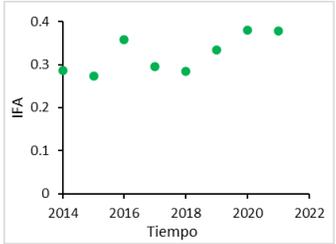
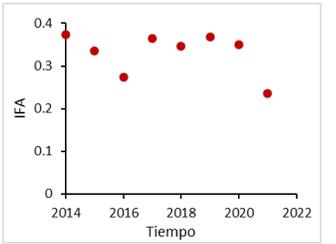
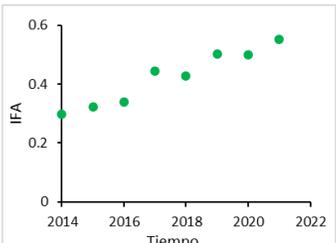
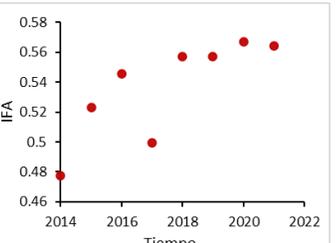
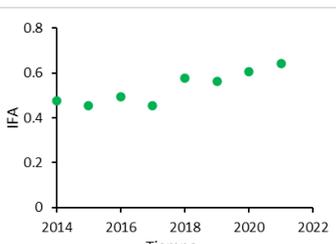
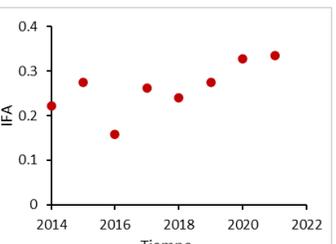
IFA			
Sitios	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
Cueva del Muerto	$r = 0.87, p < 0.05$ 	$r = 0.88, p < 0.05$ 	$p > 0.05$
Zona de Restauración Sur	$r = 0.80, p < 0.05$ 	$r = 0.89, p < 0.05$ 	$p > 0.05$
Zona de Restauración	$r = 0.94, p < 0.05$ 	$r = 0.31, p > 0.05$ 	$p < 0.001$

Tabla 7. Correlaciones entre el índice de Función Arrecifal (IFA) y el tiempo, para la escala espacial sitios. Se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente y los resultados de la prueba r-a-z de Fisher (Continuación).

IFA			
Sitios	Correlación		F de Fisher
	Transectos restaurados	Transectos no restaurados	p-valor
Túnel Amarradero	$r = 0.72, p < 0.05$ 	$r = -0.37, p > 0.05$ 	$p > 0.001$
Plataforma Pavonas	$r = 0.97, p < 0.05$ 	$r = 0.81, p < 0.05$ 	$p < 0.001$
Playa del Amor	$r = 0.91, p < 0.05$ 	$r = 0.70, p > 0.05$ 	$p > 0.05$

3.2 Diferencias en el incremento de la funcionalidad física entre R y NR

Los resultados evidenciaron que los transectos R presentaron un incremento tanto de CC como de IFA con relación a los NR (Figuras 3 y 4). Respecto a la CC (Figura 3), se encontró que el PNIM tuvo un incremento del 45.67% en los NR, mientras que en los R el incremento fue de 152.50%. A nivel de islas, en Isla Larga la CC incrementó 56.99% en los transectos NR, mientras que en los R el incremento fue de 144.79%. Así mismo, en Isla Redonda el incremento en los NR fue de 8.60%, frente a un incremento de 168.99% en los R. Cabe señalar que el incremento porcentual de la CC en los transectos NR fue mayor en Isla Larga (56.96% vs. 8.58% en Isla Redonda), pero en los R, Isla Redonda presentó mayor porcentaje de incremento con un valor de 168.99% en relación a Isla Larga (144.79%) (Figura 3).

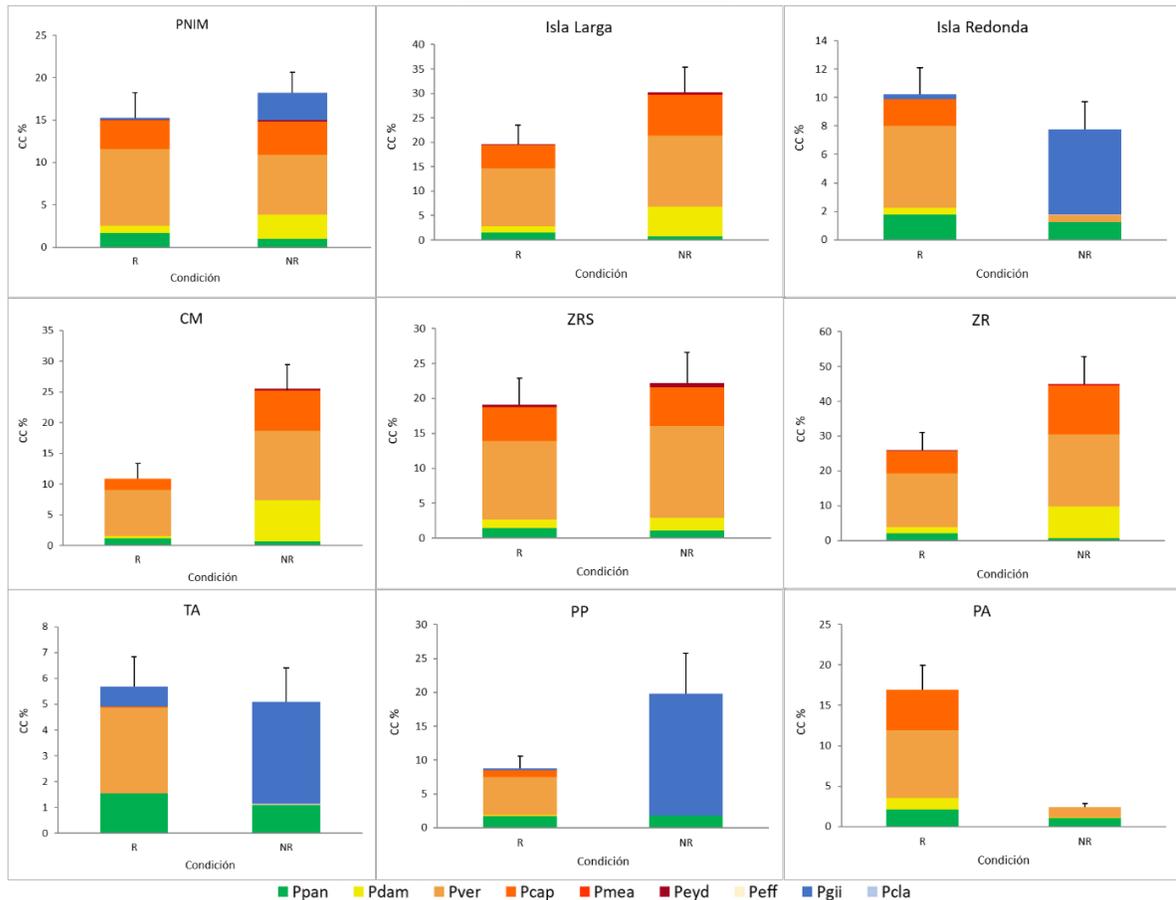


Figura 3. Gráficas de los promedios de la cobertura coralina (CC%), de acuerdo con la condición de estudio (restaurados R, no restaurados NR), en cada uno de los niveles de estudio (parque: Parque Nacional Islas Marietas (PNIM); islas: Isla Larga e Isla Redonda; sitios: Cueva del Muerto (CM), Zona de Restauración Sur (ZRS), Zona de Restauración (ZR), Túnel Amarradero (TA), Plataforma Pavonas (PP) y Playa del Amor (PA)). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (*Porites panamensis* (Ppan), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora eydouxi* (Peyd), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora gigantea* (Pgig), *Pocillopora clavus* (Pcla)).

A nivel de sitios, ZRS experimentó un mayor porcentaje de incremento en la CC en los transectos NR (127.22%) en comparación con los R (106.09%), siendo el sitio que presentó el mayor incremento en la CC de los transectos NR. Por otro lado, Túnel Amarradero mostró una disminución en la CC de los transectos NR (-56.52%); sin embargo, en los transectos R, la CC aumentó 133.33%. El sitio Plataforma Pavonas registró el mayor incremento porcentual en la CC, tanto en los transectos NR (74.85%) como en los R (238.20%); la CC de Zona de Restauración aumentó un 30.74% en los NR, mientras que en los R el incremento fue del 172.70%; Cueva del Muerto experimentó un aumento en la CC del 65.42% en los NR y del 150% en los R; por último, la CC de Playa del Amor mostró un incremento del 9.09% en los NR, mientras que en los R el incremento fue del 139.33% (Figura 3).

Al analizar la CC promedio a lo largo del tiempo de restauración (2014-2021), en los tres niveles de análisis espacial (Figura 3), se puede observar que, en el 83.33% de los casos, los transectos NR presentan una CC mayor respecto a los transectos R, a excepción de Isla Redonda (NR = 7.75%; R = 10.22%) y los sitios Túnel Amarradero (NR = 5.08%; R = 5.69%) y PA (NR = 2.37%; R = 16.96%). Cabe señalar que, existen diferencias significativas ($p < 0.05$) en el promedio de CC promedio de todos los años entre los transectos R y NR, exceptuando los de TA y ZRS ($p > 0.05$) (Figura 3, Anexo A).

Los porcentajes de incremento del IFA mostraron que el incremento en los transectos R fue mayor que el de los NR a nivel de parque, islas y sitios (Figura 4). El incremento del IFA en los transectos NR a nivel del PNIM fue de 11.02%, mientras que el de los R de 40.40%. A nivel de islas, el incremento en los transectos NR de Isla Larga fue de 15.86%, mientras que en los R de 32.27%; Isla Redonda mostró un aumento de IFA en los transectos NR de 3.68%, mientras que en los R el incremento fue de 53.41%. A nivel de sitios: Túnel Amarradero mostró un decremento (-36.83%) en el IFA de los transectos NR, pero en los transectos R el incremento fue de 32.12%; Plataforma Pavonas fue el sitio donde el IFA incrementó en mayor medida en los transectos R (86.33%), el incremento en los NR fue de 18.14%; Cueva del Muerto incrementó 37.03% en los R, mientras que en los NR 15.84%; Playa del Amor presentó un incremento en los R de 35.39%, frente al 21.79% en los NR; Zona de Restauración mostró un incremento en el IFA de los transectos R de 35.30%, mientras que en los NR de 8.47%; por último, el incremento en Zona de Restauración Sur fue similar en ambas condiciones, en los R fue de 26.08% y, en los NR de 26.01% (Figura 4).

Al analizar el IFA promedio a lo largo del tiempo de restauración (2014-2021) en los tres niveles de análisis espacial (Figura 4), se puede observar que, en la mayor parte de los casos, los transectos NR presentan un IFA mayor respecto a los transectos R, a excepción del PNIM (IFA-NR = 0.49; IFA-R = 0.50), Isla Redonda (IFA-NR = 0.36; IFA-R = 0.43) y el sitio Playa del Amor (IFA-NR = 0.26; IFA-R = 0.53). Cabe señalar que, se evidenciaron diferencias significativas entre los transectos R y NR de Isla Redonda ($t = 7.49$, $p < 0.05$) y

Playa del Amor ($t= 13.14$, $p < 0.05$), no así en el PNIM ($t= 0.91$, $p > 0.05$); así mismo, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los transectos R y NR en Isla Larga ($t=-10.62$, $p < 0.05$), y en todos los sitios restantes a excepción de Túnel Amarradero ($t=-0.47$, $p > 0.05$) (Figura 4, Anexo A).

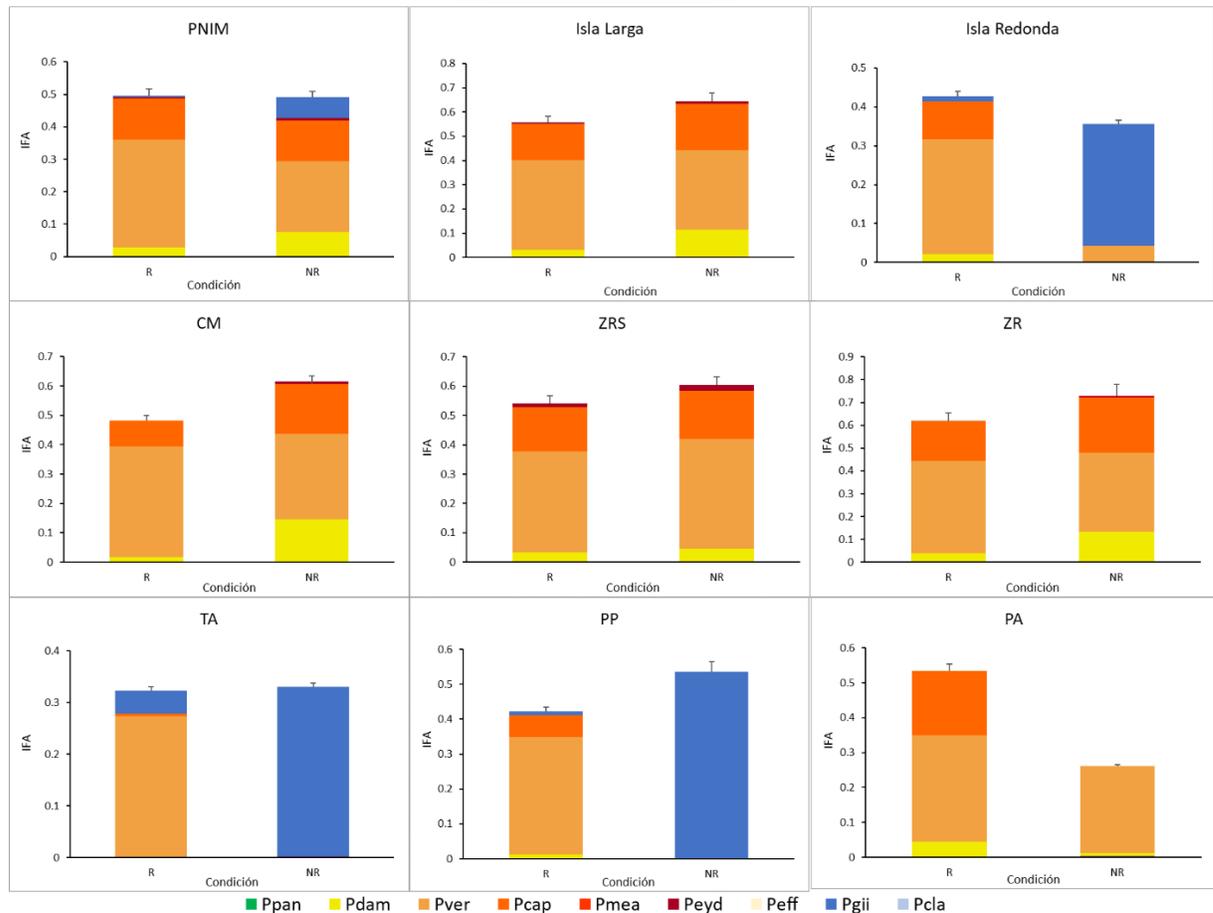


Figura 4. Gráficas de los promedios del Índice de Función Arrecifal (IFA) de acuerdo con la condición de estudio (restaurados R, no restaurados NR), en cada uno de los niveles de estudio (parque: Parque Nacional Islas Marietas (PNIM); islas: Isla Larga e Isla Redonda; sitios: Cueva del Muerto (CM), Zona de Restauración Sur (ZRS), Zona de Restauración (ZR), Túnel Amarradero (TA), Plataforma Pavonas (PP) y Playa del Amor (PA)). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (*Porites panamensis* (Ppan), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora eydouxi* (Peyd), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora gigantea* (Pgi), *Pocillopora clavus* (Pcla)).

3.3 Aporte a la funcionalidad física por géneros coralinos

En los gráficos de la CC y el IFA promedio (Tablas 1-6) se puede observar que el género de coral dominante es *Pocillopora*, seguido de *Pavona* y por último *Porites*. Cabe destacar que, en los gráficos correspondientes, la baja cobertura de *Porites* provoca que el aporte del IFA promedio sea imperceptible (Tablas 4-6). Los resultados del análisis de correlación entre la CC por género y el IFA, en los tres niveles

espaciales de análisis (Tablas 7-9), demostraron que, en el 88.89% de los transectos R las correlaciones más altas (≥ 0.94) y significativas ($p < 0.05$) se dieron entre la CC del género *Pocillopora* y el IFA, es decir que al aumentar la CC de *Pocillopora*, aumenta el IFA. A excepción del sitio Túnel Amarradero donde la correlación con *Pocillopora*, no fue significativa ($p > 0.05$). Así mismo, es importante mencionar que no se encontró correlación del IFA con la cobertura de *Pavonas* y *Porites* (Tablas 7-9).

En el caso de los transectos NR, el comportamiento del aporte de la CC por géneros al IFA, tuvo un comportamiento diferente respecto a los transectos R (Tablas 7-9). A nivel del PNIM los géneros *Pocillopora* y *Pavona* presentaron las correlaciones más altas ($r = 0.85$ y $r = 0.82$, respectivamente), además, ambas correlaciones fueron significativas ($p < 0.05$) (Tabla 7).

A nivel de islas, en Isla Larga el género *Pocillopora* fue el que tuvo la correlación significativa más alta ($r = 0.99$, $p < 0.05$); el género *Pavona* no presentó ningún tipo de correlación, puesto que su CC no aportó al IFA en ninguno de los sitios que la conforman (Cueva del Muerto, Zona de Restauración Sur y Zona de Restauración); el género *Porites* no presentó correlación con el IFA. En Isla Redonda, no se evidenció correlación entre el IFA y ninguno de los tres géneros de corales presentes ($p < 0.05$; Tabla 7).

Adicionalmente, los transectos NR a nivel de sitios tuvieron comportamientos distintos: CM, ZRS y ZR mostraron un comportamiento similar a los transectos R, donde el género *Pocillopora* fue el que presentó las correlaciones significativas más altas ($r \geq 0.98$), entre su CC y el IFA promedio por año; así mismo, no se encontró correlación del IFA con la cobertura de *Porites*.

Como se mencionó con anterioridad, el género *Pavona* no presentó ninguna correlación. En TA y PP, las correlaciones más altas y significativas ($p < 0.05$) fueron las correspondientes al aporte de la cobertura de *Pavona* al IFA, siendo en Túnel Amarradero de $r = 0.79$, mientras que en Plataforma Pavonas la correlación fue total ($r = 1.00$), es decir, que el IFA en Plataforma Pavonas depende completamente de la CC de *Pavona* y en ambos casos, o se evidenció correlación del IFA con la cobertura del género *Pocillopora*. Por último, en Playa del Amor no se encontró correlación del IFA con ninguno de los géneros *Pocillopora* y *Porites* (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de las escalas espaciales parque e islas. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente.

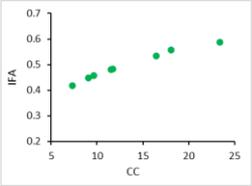
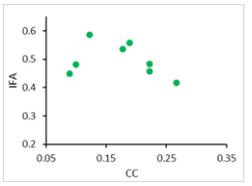
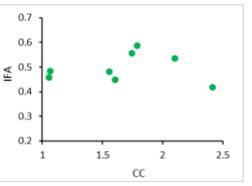
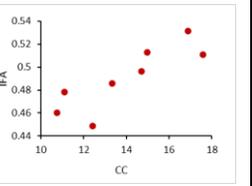
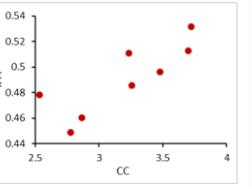
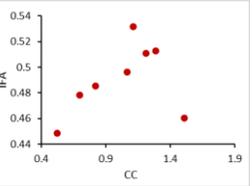
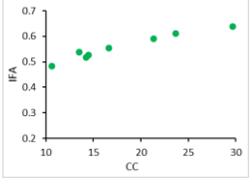
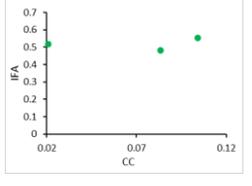
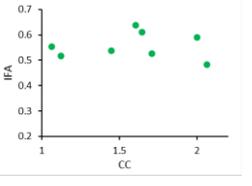
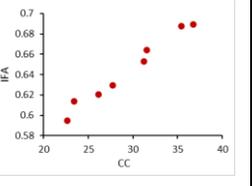
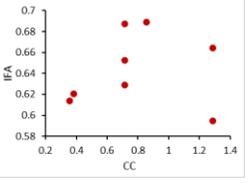
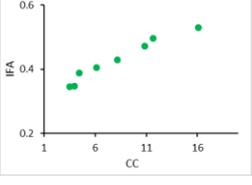
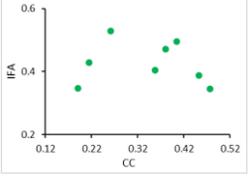
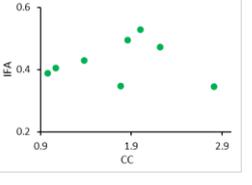
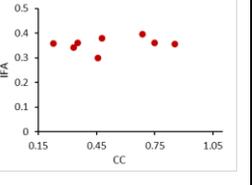
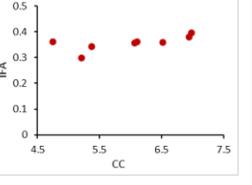
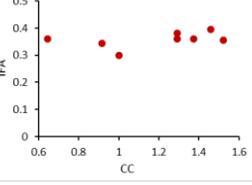
Aporte de la CC por género al IFA						
	Transectos restaurados			Transectos no restaurados		
	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>
PNIM	$r = 0.99, p < 0.05$ 	$r = -0.31, p > 0.05$ 	$r = 0.05, p > 0.05$ 	$r = 0.85, p < 0.05$ 	$r = 0.82, p < 0.05$ 	$r = 0.39, p > 0.05$ 
Isla Larga	$r = 0.97, p < 0.05$ 	$r = -0.48, p > 0.05$ 	$r = 0.01, p > 0.05$ 	$r = 0.99, p < 0.05$ 	-	$r = 0.10, p > 0.05$ 
Isla Redonda	$r = 0.98, p < 0.05$ 	$r = -0.11, p > 0.05$ 	$r = 0.03, p > 0.05$ 	$r = 0.24, p > 0.05$ 	$r = 0.69, p > 0.05$ 	$r = 0.44, p > 0.05$ 

Tabla 9. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de la escala espacial sitios. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente.

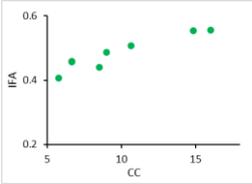
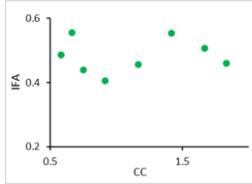
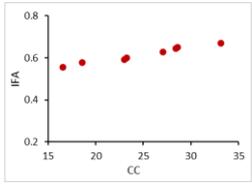
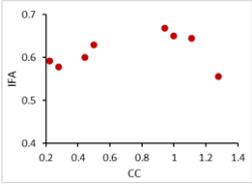
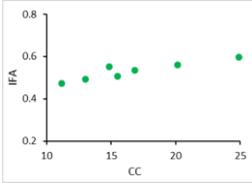
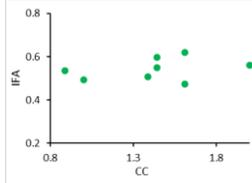
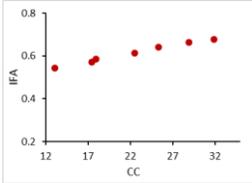
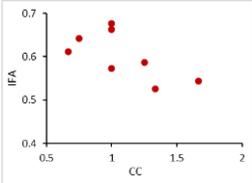
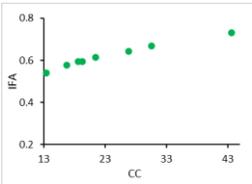
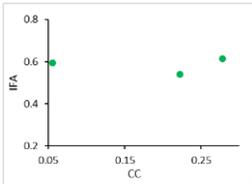
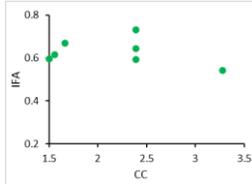
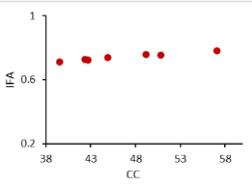
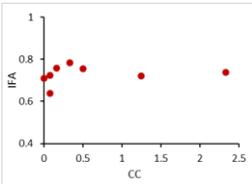
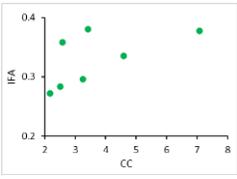
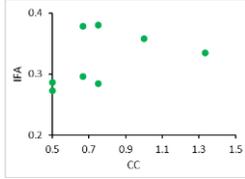
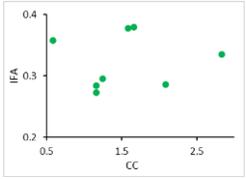
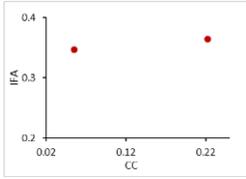
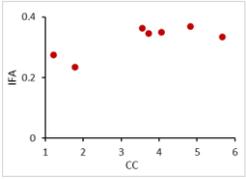
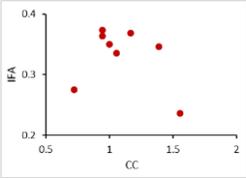
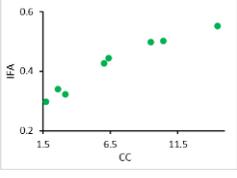
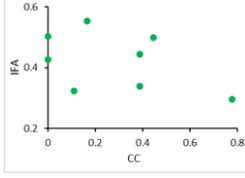
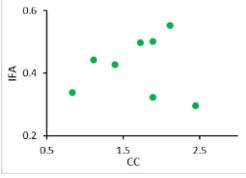
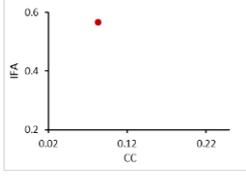
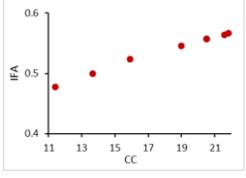
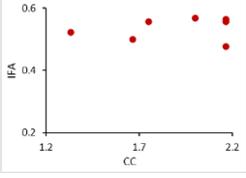
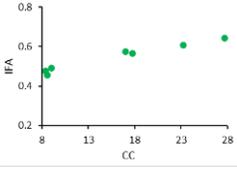
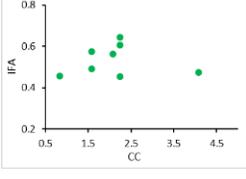
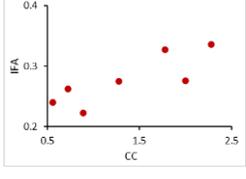
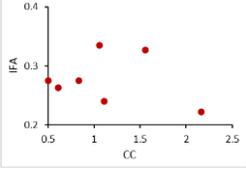
Aporte de la CC por género al IFA						
	Transectos restaurados			Transectos no restaurados		
	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>
Cueva del Muerto	$r = 0.94, p < 0.05$ 	-	$r = 0.07, p > 0.05$ 	$r = 0.99, p < 0.05$ 	-	$r = 0.26, p > 0.05$ 
Zona de Restauración Sur	$r = 0.95, p < 0.05$ 	-	$r = 0.32, p > 0.05$ 	$r = 0.99, p < 0.05$ 	-	$r = -0.65, p > 0.05$ 
Zona de Restauración	$r = 0.99, p < 0.05$ 	$r = -0.44, p > 0.05$ 	$r = -0.9, p > 0.05$ 	$r = 0.98, p < 0.05$ 	-	$r = 0.16, p > 0.05$ 

Tabla 10. Correlaciones entre el Índice de Función Arrecifal (IFA) y la cobertura coralina (CC) de los diferentes géneros de coral reportados en el PNIM, de la escala espacial sitios. En la tabla se muestran los valores r de cada correlación, así como el gráfico de dispersión correspondiente (continuación).

Aporte de la CC por género al IFA						
	Transectos restaurados			Transectos no restaurados		
	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>	<i>Pocillopora</i>	<i>Pavona</i>	<i>Porites</i>
Túnel Amarradero	$r = 0.66, p > 0.05$ 	$r = 0.41, p > 0.05$ 	$r = 0.06, p > 0.05$ 	$r = 0.30, p > 0.05$ 	$r = 0.79, p < 0.05$ 	$r = -0.31, p > 0.05$ 
Plataforma Pavonas	$r = 0.97, p < 0.05$ 	$r = -0.45, p > 0.05$ 	$r = 0.05, p > 0.05$ 	$r = 0.37, p > 0.05$ 	$r = 1.00, p < 0.05$ 	$r = 0.04, p > 0.05$ 
Playa del Amor	$r = 0.98, p < 0.05$ 	-	$r = -0.01, p > 0.05$ 	$r = 0.61, p > 0.05$ 	-	$r = 0.19, p > 0.05$ 

Capítulo 4. Discusión

4.1 Funcionalidad física y cobertura coralina a través del tiempo

En la mayoría de los casos el incremento de la CC y el IFA muestra una tendencia positiva con el avance del tiempo en ambas condiciones de estudio (R y NR), mostrando que, en el PNIM, existe una tendencia a la recuperación de las comunidades coralinas, incluso en zonas donde no se han realizado esfuerzos de restauración activa. Se ha documentado que las comunidades coralinas del POT han podido sobrevivir después de las anomalías térmicas causadas por eventos El Niño (anomalías de hasta $+3.5^{\circ}\text{C mo}^{-1}$; El Niño 1997-1998 y 2016), sugiriendo incluso, que estos arrecifes podrían tener la capacidad de resistir o recuperarse parcialmente a eventos de estrés ambiental debido a cambios naturales y antrópicos (Romero-Torres *et al.*, 2020; Martínez-Castillo *et al.*, 2022).

Al realizar el análisis a nivel de sitios, se pudo observar que no en todos los sitios de estudio la CC e IFA presentaron una tendencia positiva a través del tiempo. Playa del Amor y Túnel Amarradero son dos de los tres sitios en los que, en los transectos NR, la trayectoria de la CC e IFA no está correlacionada con el tiempo. Ambos sitios se encuentran en Isla Redonda, que es la isla más cercana a tierra y con menos presencia de corales, comparada con Isla Larga (CONANP, 2007). En un estudio realizado por Cupul-Magaña & Rodríguez-Troncoso (2017), reportaron que el sitio TA era el más impactado por el buceo autónomo y que PA era el más impactado por buceo libre. Ambas actividades, al incrementarse desmedidamente, impactan negativamente al ecosistema arrecifal, reduciendo la cobertura coralina y ocasionando una pérdida de biodiversidad (Harriott, 2004; Sotelo-Casas *et al.*, 2016; Cupul-Magaña & Rodríguez-Troncoso, 2017). Lo anterior, aunado a las características físicas de la isla, como mayor profundidad, puede explicar que la tendencia en la trayectoria de la CC e IFA a lo largo de los años de estudio, en los transectos NR de estos sitios no aumente conforme aumenta el tiempo, e incluso para el caso de TA la correlación sea negativa. Cabe señalar que, puesto que en los transectos NR no se llevó a cabo ningún tipo de restauración asistida, por lo que no hay una recuperación natural en ambos sitios.

Por otro lado, dado que el sitio Zona de Restauración está ubicado en Isla Larga, que es la isla más alejada a la línea de costa (CONANP, 2007), además de presentar una alta supervivencia de corales trasplantados, debido a la poca profundidad y alta tasa de fragmentación natural, es considerado un sitio óptimo para la obtención de reclutas (Tortolero-Langarica *et al.*, 2014, 2019) y es el único sitio que presenta una plataforma coralina bien desarrollada. La ausencia de una correlación significativa entre el incremento de

la CC e IFA con el tiempo, en los transectos NR, de ZR en particular, puede atribuirse a las fluctuaciones a través del tiempo en ambas variables y, no a que no exista un incremento sostenido. Es relevante señalar que los otros dos sitios de esta isla, Zona de Restauración Sur y Cueva del Muerto, muestran una correlación entre el incremento de la CC y el IFA con el tiempo. Esto sugiere que la tendencia en IL es que exista esta correlación en ambas variables, debido a la estructura física de la isla. Estas observaciones se ven respaldadas por las altas correlaciones en IL a nivel de islas ($r > 0.85$), tanto para la CC como para el IFA con el tiempo.

4.1.1 Cobertura coralina a través del tiempo

En relación con la tendencia del incremento de la CC a través del tiempo, en todos los niveles espaciales de estudio se encontraron correlaciones más altas en los transectos R, lo cual indica que los esfuerzos de restauración activa están contribuyendo a un mayor incremento de la CC en el PNIM. Se ha demostrado que los esfuerzos de restauración contribuyen a un incremento en la CCV (Hein *et al.*, 2021); sin embargo, nunca se considera cómo el esfuerzo de restauración es diferencial entre las partes del sitio que son o no intervenidos, así como la evidencia de recuperación natural en paralelo a la recuperación asistida. Así mismo, no es de extrañar que, respecto a la CC, tanto a nivel de islas como a nivel de sitios Isla Larga presente las correlaciones más altas tanto en los transectos R como en los NR, comparado con IR, puesto que es la isla que tiene mayor cobertura de corales ramificados en el PNIM e inclusive, una matriz arrecifal desarrollada, asociada a que posee una mayor extensión de plataforma, un alejamiento a la línea de costa y menor profundidad (Sotelo-Casas *et al.*, 2016; CONANP, 2007; Hernández-Zulueta *et al.*, 2017).

A pesar de que los transectos R del sitio Túnel Amarradero mostraron una tendencia positiva del incremento de la CC a través del tiempo, la correlación fue menor. Isla redonda se caracteriza por una estructura física de una plataforma corta, por lo que se presenta una pronunciada pendiente, teniendo la mayor cobertura de coral a una profundidad de ~ 9 m (Sotelo-Casas *et al.*, 2016), lo cual se encuentra por debajo de los límites óptimos para la construcción de estructuras arrecifales descritos para el POT (Glynn *et al.*, 2017). Como resultado, la CC en TA tiene un incremento menor en relación de otros sitios, a pesar de que está sujeta a esfuerzos de restauración activa.

Cabe señalar que el decremento observado en la trayectoria de la CC durante 2016-2018 en todos los niveles espaciales de estudio coincide con el evento El Niño 2015-2016, considerado como el primer ENSO extremo del siglo XXI (Santoso *et al.*, 2017). Se ha registrado que este evento tuvo un impacto negativo en los arrecifes coralinos del POT (Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023a). Específicamente, en el PNIM, se registró

una mayor cobertura de corales blanqueados, pálidos e incluso muertos como resultado de distintos eventos ENSO, entre los que se encuentra el de 2015-2016 (Cruz-García *et al.*, 2020). Por lo que se puede inferir que el decremento observado en la trayectoria de la CC y, en menor medida en el IFA, fue generado por dicho evento. Cabe destacar que si bien, existe una recuperación que se ve reflejada en el aumento de la CC a partir del 2018 debido a la resistencia térmica que presentan los corales del área, específicamente del género *Pocillopora*, el evento ENSO 2015-2016 tuvo mayor impacto negativo en los transectos NR, por lo que se puede inferir que los esfuerzos de restauración activa que se llevaron a cabo durante dicha temporada sirvieron para mantener la CC.

4.1.2 Funcionalidad física a través del tiempo

Para el caso específico del IFA, el patrón fue diferente. Si bien, todos los transectos R en los tres niveles de estudio mostraron correlaciones significativas, no en todos los casos mostraron las correlaciones más altas. Esto demuestra que, en Cueva del Muerto y Zona de Restauración en Isla Larga, la funcionalidad física está aumentando de manera similar con y sin esfuerzos de restauración activa. Lo cual resulta importante, puesto que, pareciera estar indicando que los esfuerzos de restauración activa en Isla Larga no están generando un impacto que genere diferencias entre R y NR debido probablemente a las características físicas previamente descritas (menor gradiente de profundidad, matriz arrecifal desarrollada) y a que históricamente no se ha ejercido tanta presión antrópica como en el caso de los sitios de IR, en donde, en comparación, sí se encontraron diferencias significativas entre las correlaciones de los R y los NR. No obstante, no hay que perder de vista que este análisis sólo toma en cuenta la trayectoria a través del tiempo y no el aumento por sí mismo de la CC y el IFA.

Se ha descrito que la cobertura coralina es una representación incompleta de la condición y el funcionamiento del arrecife (González-Barríos & Álvarez-Filip, 2018). El presente estudio mostró la tendencia del IFA a través del tiempo y, con respecto a los transectos restaurados y no restaurados. Esto permite observar que el IFA es un indicador más sensible que la CC, ya que, en ambos casos, dos de los tres sitios de estudio en IR (Playa del Amor y Túnel Amarradero), no mostraron correlaciones significativas. Si se hubiera realizado el análisis sólo a nivel de islas y tomando en cuenta sólo el comportamiento de la CC a través del tiempo se interpretaría que, en los transectos NR de ambas islas, existe una recuperación natural de la CC. No obstante, el análisis de la funcionalidad física a través del IFA, nos indica que en Isla Redonda el IFA no aumenta con el tiempo, lo que le da importancia a la restauración activa en la isla, puesto que este resultado indica que en los transectos NR no existe una recuperación natural de la

funcionalidad física arrecifal. Por lo que el análisis del comportamiento a través del tiempo utilizando no solo la CC, sino también el IFA, nos permite entender de manera más completa el estado del arrecife, ya sea utilizando o no, restauración activa. A pesar de ello, la CC sigue siendo una métrica ampliamente utilizada para informar sobre los resultados obtenidos en diversos esfuerzos de restauración por lo que resulta útil para poder comparar resultados y evidencias entre diferentes estudios (Muñoz-Alfaro *et al.*, en prensa).

4.2 Diferencias en el incremento de la cobertura coralina y la funcionalidad física entre R y NR

Los porcentajes de aumento de la CC e IFA del 2014 al mostraron una tendencia a ser mayores en los transectos R, comparados con los NR. Lo anterior, fortalece la premisa de que, en el PNIM, el esfuerzo de restauración activa realizada está ayudando a la recuperación y conservación de los arrecifes coralinos, al menos en términos de CC y a nivel funcional (funcionalidad física).

A nivel de islas, se observó que los transectos NR de Isla Larga mostraron un mayor porcentaje de incremento en comparación con Isla Redonda, tanto en CC como en IFA, respaldando la idea de una mejor recuperación natural en las comunidades coralinas de Isla Larga. Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades físicas de la isla, así como el hecho de que no se lleven a cabo actividades turístico-recreativas, le han permitido mantener una mayor cobertura de coral vivo (Sotelo-Casas *et al.*, 2016; CONANP, 2007; Hernández-Zulueta *et al.*, 2017). Además, Isla Larga cuenta con una mayor cobertura de especies del género *Pocillopora* (Sotelo-Casas *et al.*, 2016), que se ha demostrado que poseen una mayor resistencia a las anomalías térmicas del POT (Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023b); y sumado a su alta tasa de crecimiento, supervivencia y calcificación, en comparación con los otros géneros presentes en el área (*Porites* y *Pavona*) (Romero-Torres *et al.*, 2017; Tortolero-Langarica *et al.*, 2017; Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023b), provoca que el incremento tanto en la CC como en el IFA sea comparativamente mayor en relación a Isla Redonda. Esto sugiere que, aunque Isla Redonda no es tan propicia para la recuperación natural de los corales, los esfuerzos de restauración utilizando especies ramificadas del género *Pocillopora* están mejorando su capacidad de resistencia, incluso frente a presiones antropogénicas (Martínez-Castillo *et al.*, 2020).

A nivel de sitios, cabe mencionar que el único que presentó mayor porcentaje de incremento de CC en los transectos NR, fue Zona de Restauración Sur. Sin embargo, dado que se encuentra ubicado en Isla Larga y,

como ya se discutió anteriormente, en esta isla la trayectoria en la recuperación de las comunidades coralinas es similar a la asistida, resulta comprensible que los transectos NR de Zona de Restauración Sur incrementaran un poco más que los R. No obstante, el IFA de Zona de Restauración Sur sí incrementó un poco más en los transectos R (IFA = 26.08) respecto a los NR (IFA = 26.02). Se ha demostrado que la funcionalidad física de los arrecifes de coral está estrechamente relacionada con el ensamblaje y la abundancia de especies que desempeñan funciones clave en la construcción de arrecifes (González-Barrios & Álvarez-Filip *et al.*, 2018; Cabral-Tena *et al.*, 2018, 2020). En el Pacífico mexicano, se ha determinado que las especies del género *Pocillopora* son especialmente importantes para el potencial funcional físico del área (Cabral-Tena *et al.*, 2020), lo que podría explicar que, aunque la CC sea mayor en los transectos NR debido a que la restauración se llevó a cabo utilizando especies de *Pocillopora*, los transectos R tengan mayor IFA.

El análisis de la CC y el IFA en los transectos NR del sitio Túnel Amarradero, mostró un porcentaje de decremento en ambas variables. Estos resultados demuestran que las condiciones mencionadas del sitio, como el alto impacto de actividades turísticas y la mayor profundidad, impiden su recuperación natural e incluso, después de siete años de estudio, se observe una disminución en la CC y en la funcionalidad física del arrecife. Además, a nivel regional, Túnel Amarradero es el sitio que presenta la mayor cobertura de arena, lo cual disminuye el sustrato disponible para el reclutamiento de colonias coralinas, contribuyendo a una baja CC y a la formación de arrecifes más pequeños (Hernández-Zulueta *et al.*, 2017). Esto ayuda a comprender por qué, debido a este conjunto de condiciones desfavorables en Túnel Amarradero, sin intervenciones de restauración activa, el sitio no está experimentando una recuperación similar a los demás. Es importante destacar que el sitio Playa del Amor también ha experimentado una fuerte presión antrópica (Cupul-Magaña & Rodríguez-Troncoso, 2017), sin embargo; los transectos NR en ese sitio mostraron un ligero incremento tanto en la CC como en el IFA. Esto se debe probablemente a que Playa del Amor se encuentra a una menor profundidad y su sustrato predominante es rocoso en lugar de arenoso, lo que puede propiciar el asentamiento de los corales, a diferencia de Túnel Amarradero (Sotelo-Casas *et al.*, 2016; Hernández-Zulueta *et al.*, 2017).

Tanto en la CC, como en el IFA, el sitio Zona de Restauración Sur mostró el mayor incremento porcentual en los transectos NR en todo el PNIM. Sin embargo, es destacable que el sitio Plataforma Pavonas presentó el mayor porcentaje de incremento en los transectos R, superando incluso a todos los sitios de Isla Larga. Estos resultados resaltan una vez más la importancia de la restauración activa en las zonas impactadas del PNIM, utilizando especies clave de coral. Es interesante considerar que el marcado aumento observado en el sitio Plataforma Pavonas puede estar relacionado con la composición inicial de los transectos R,

caracterizada por una baja cobertura coralina compuesta principalmente por especies masivas del género *Pavona*. Aunque estas especies tienen un CF relativamente alto, no alcanzan el CF que presenta el género *Pocillopora*. Por lo tanto, la introducción estratégica de especies clave de este género durante el proceso de restauración puede explicar el notable incremento observado en el sitio Plataforma Pavonas.

4.2.1 Diferencias en el incremento de la cobertura coralina entre R y NR

La existencia de diferencias significativas en la CC promedio entre los transectos R y los NR en la mayoría de los casos y en todos los niveles espaciales de estudio, a excepción de los sitios Zona de Restauración Sur y Túnel Amarradero, podría indicar que los esfuerzos de restauración activa implementados en el PNIM están generando efectos diferenciadores en el área. Además, puesto que se observó que en la mayoría de los casos los incrementos porcentuales de la CC fueron mayores en los transectos R, y que la trayectoria de aumento de la CC a lo largo del tiempo de restauración es positiva, significativa y difiere entre los transectos R y los NR, especialmente en Isla Redonda, se puede inferir que, las acciones de restauración activa están provocando cambios positivos en la CC, permitiendo un aumento más rápido de lo que ocurriría de manera natural. A pesar de que se reconoce que la CC puede ser una medida limitada para evaluar la condición y el funcionamiento de los arrecifes (González-Barrios & Álvarez-Filip, 2018), sigue siendo una métrica ampliamente utilizada para informar sobre los resultados de diversos esfuerzos de restauración, permitiendo la comparación y el análisis de evidencias entre diferentes estudios.

Es importante destacar que la falta de diferencias significativas en la CC entre los transectos R y NR en el sitio ZRS sugiere una recuperación similar, tanto con esfuerzos de restauración activa como de manera natural. Esto indica que las comunidades coralinas del sitio poseen una capacidad innata para recuperarse de manera efectiva. Sin embargo, no hay que perder de vista que en los transectos NR no se llevaron acciones de restauración, puesto que inicialmente en esas zonas no se necesitaban al ser zonas mejor conservadas. A pesar de ello, estos resultados resaltan la importancia de considerar las características específicas de cada sitio al implementar estrategias de restauración activa, ya que algunos lugares pueden tener una capacidad inherente para recuperarse sin requerir intervenciones adicionales significativas.

Por el contrario, la ausencia de diferencias en la CC promedio en el sitio TA podría sugerir inicialmente que los esfuerzos de restauración no están logrando resultados efectivos en ese sitio. Sin embargo, es importante recordar que mientras en los transectos NR se observó un decremento porcentual en la CC (-56.52 %), en los transectos R se registró un incremento (133 %). Esta discrepancia indica que la falta de diferencias no necesariamente significa que los esfuerzos de restauración sean ineficaces. Es posible que

los transectos R estén compensando o contrarrestando los efectos negativos observados en los transectos NR, lo que sugiere que la restauración está teniendo un impacto positivo en la recuperación de TA, a pesar de que las condiciones no son óptimas en el sitio.

Ahora bien, considerando que al inicio del programa de restauración del PNIM en 2014, la CC promedio era mayor en los transectos NR con un 15.13%, en comparación con los transectos R con un 10.01%. Sin embargo, para el año 2021, la situación se invirtió y la CC promedio en los transectos R alcanzó un 25.28%, superando a los NR que registraron un 22.04% (Anexo B). Se respalda la idea de que, en general, la restauración está teniendo éxito en la recuperación de la CC en el Parque Nacional. Muñoz-Alfaro *et al.* (en prensa), mencionan, a partir del análisis de dos sitios del PNIM, que la recuperación de la CC ligada a las acciones de restauración permitiría alcanzar los valores históricos reportados para el estado de Nayarit en 1991 (>35%).

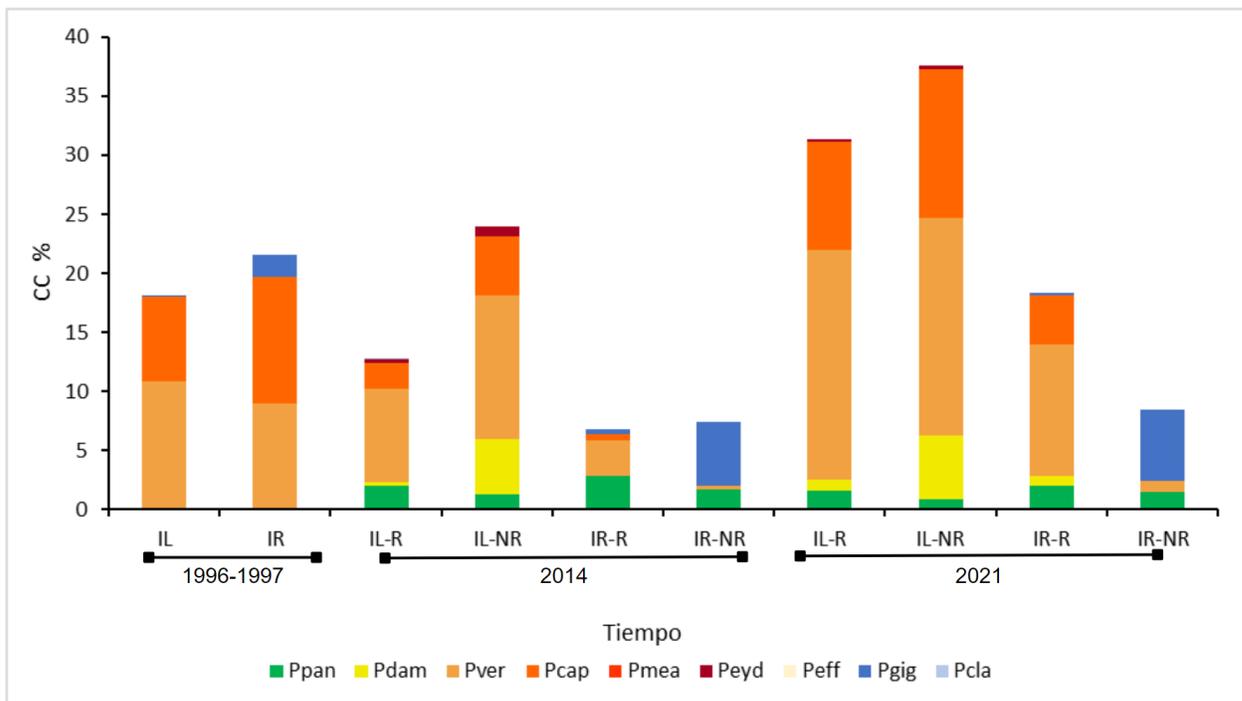


Figura 5. Valores de CC (%) reportados por Rodríguez-Zaragoza (2001), junto con los obtenidos en el presente estudio para 2014 y 2021, a nivel de islas: Isla Larga (IL), Isla Redonda (IR). Así como para ambas condiciones de estudio: transectos restaurados (R) y transectos no restaurados (NR). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (*Porites panamensis* (Ppan), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora eydouxi* (Peyd), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora gigantea* (Pgig), *Pocillopora clavus* (Pcla)).

Rodríguez-Zaragoza (2001), reporta que para el periodo 1996-1997, es decir, antes de uno de los fenómenos El Niño más fuertes registrados (Martínez-Castillo *et al.*, 2022), Isla Larga presentaba una CC promedio de 20.5%, mientras que Isla Redonda una de 21.7% (Figura 5). Al comparar los datos de 1996-

1997, con los del presente estudio, donde para el 2021 Isla Larga obtuvo una CC de 31.31% en los R y de 37.60% en los NR, mientras que Isla Redonda presentó una CC de 18.38% en los R y de 8.43% en los NR (Anexo B; Figura 5). Los resultados sugieren que actualmente la CC en Isla Larga ha sobrepasado sus valores históricos en ambas condiciones de estudio. Mientras que, en Isla Redonda los transectos R están alcanzando los valores históricos. Sin embargo, para el 2021, los NR se encontraban por debajo de los valores reportados, es decir, que las comunidades coralinas de Isla Redonda no están logrando recuperarse de manera natural. Cabe señalar que, debido a las diferencias en la metodología utilizada para medir la CC entre el estudio de Rodríguez-Zaragoza (2001) y el presente estudio, es necesario utilizar los datos con precaución. Sin embargo, estos datos brindan una idea general de la trayectoria de la CC en el PNIM.

Bajo este contexto, se puede inferir que la CC del PNIM, efectivamente está recuperando sus valores históricos tanto en los transectos NR, siempre y cuando las condiciones tanto antrópicas como naturales lo permitan (por ejemplo, en IL), así como en los R. Sin embargo, la recuperación es mayor en los R, derivado de las acciones de restauración implementadas.

4.2.2 Diferencias en el incremento de la funcionalidad física entre R y NR

Al analizar las diferencias en el IFA promedio entre los transectos R y los NR. Se refleja de igual manera, que las acciones de restauración generan resultados positivos puesto que en la mayoría de los casos existen diferencias significativas entre el IFA promedio de ambas condiciones. A diferencia de la CC, en el IFA, el único sitio que no mostró este patrón fue Túnel Amarradero, sin embargo, a nivel del PNIM, tampoco se obtuvieron diferencias significativas entre el IFA promedio de los transectos R y NR. Esto resulta interesante puesto que, para el caso de Túnel Amarradero, al igual que en la CC, el porcentaje de decremento del IFA de 2014 a 2021, en los transectos NR, es un indicador de que, sin acciones de restauración, en Túnel Amarradero la comunidad coralina no recuperaría su funcionalidad física, a pesar de que al menos, hasta el año 2021 no se encuentren diferencias significativas entre ambas condiciones, por lo que sería importante seguir analizando el comportamiento del IFA en años subsecuentes.

Así mismo, el no encontrar diferencias significativas en el IFA promedio a nivel del PNIM entre ambas condiciones de estudio, a diferencia de la CC que sí mostró diferencias significativas, podría sugerir que la recuperación de la funcionalidad física lleva más tiempo que la recuperación de la CC. Es importante destacar que, González-Barrios *et al.* (2021), mencionan que la CC puede subestimar las respuestas de los sistemas biológicos frente a las presiones naturales y antropogénicas. Por lo tanto, resulta crucial seguir monitoreando y analizando la trayectoria del IFA en años subsecuentes para comprender plenamente la

recuperación y el estado funcional de los arrecifes de coral en el PNIM. Sin embargo, con base en los diferentes resultados obtenidos tanto de la trayectoria y los porcentajes de incremento del IFA, se puede inferir que, en general, las acciones de restauración están logrando recuperar la funcionalidad física de estos arrecifes.

Puesto que a nivel del PNIM en 2014 el promedio del IFA en los transectos NR era mayor (0.46 ± 0.18) que el de los R (0.42 ± 0.14) y, que para el año 2021 esto se invirtió, siendo mayor el de los R (0.59 ± 0.15) que el de los NR (0.51 ± 0.21). Se apoya la idea de que, de manera general, las acciones de restauración están incrementando la funcionalidad física del Parque de manera más rápida. En el contexto del Pacífico mexicano, hasta ahora el análisis de la funcionalidad física de los arrecifes de coral a través del IFA se ha abordado únicamente en un estudio realizado por Cabral-Tena *et al.* (2020), en la zona de Huatulco, donde se reportó un valor de IFA de 0.71 ± 0.10 . Comparado con los resultados obtenidos en el PNIM, se puede notar que es más alto que el obtenido en la investigación actual para ambas condiciones de estudio. Si embargo, Muñoz-Alfaro *et al.* (en prensa), mencionan que, dado que Huatulco exhibe una mayor CC, principalmente compuesta por especies de pocilopóridos, es previsible que presente valores más altos de IFA, ya que estas especies contribuyen significativamente a la funcionalidad física del arrecife.

Cabe señalar que, puesto que el IFA es un índice relativamente nuevo, este estudio es el primero en el que se analizan las comunidades coralinas del PNIM bajo este enfoque. A pesar de ello, con base en los datos de CC por especie y, a nivel de islas, publicados por Rodríguez-Zaragoza (2001) para los años 1996-1997, fue posible realizar un cálculo del IFA que reflejara la funcionalidad física coralina para esos años (Figura 6). Los resultados obtenidos a partir del cálculo del IFA de 1996-1997, muestran que, para principios del programa de restauración (2014), la FF del arrecife coralino de Isla Larga en los transectos R tenía valores similares a la de 1996-97, no así la de los transectos NR; mientras que el IFA de Isla Redonda en ambas condiciones de estudio (R y NR), se encontraba por debajo del calculado para 1996-1997 (Figura 6). Sin embargo, después de los esfuerzos de restauración activa realizados en el PNIM, se refleja que, la FF en Isla Larga sobrepasa la reportada en 1996-97. Por otro lado, en Isla Redonda los resultados muestran que para el 2021, en los transectos R, la FF se estaba recuperando, acercándose incluso a los valores históricos. Por el contrario, en los transectos NR, el IFA del 2021 tiene valores similares al de 2014, lo que refleja que la recuperación natural de Isla Redonda no está siendo suficiente para alcanzar los valores históricos de FF, lo que evidencia la importancia de realizar acciones de restauración activa en zonas altamente impactadas, como los sitios de Isla Redonda.

Es importante tener una visión integral al analizar los promedios generales tanto de la CC como del IFA, en los transectos NR y R. Si se enfocara únicamente en los promedios generales, es posible que se llegue a la

conclusión errónea de que la restauración no está funcionando, ya que en la mayoría de los casos los transectos NR presentan valores más altos. Sin embargo, es fundamental considerar la trayectoria de la restauración a lo largo del tiempo para obtener una perspectiva completa. Al comparar los valores iniciales y los actuales, se observó un mayor incremento en los transectos R, lo cual indica que la restauración está teniendo un impacto positivo en la recuperación de la CC e IFA.

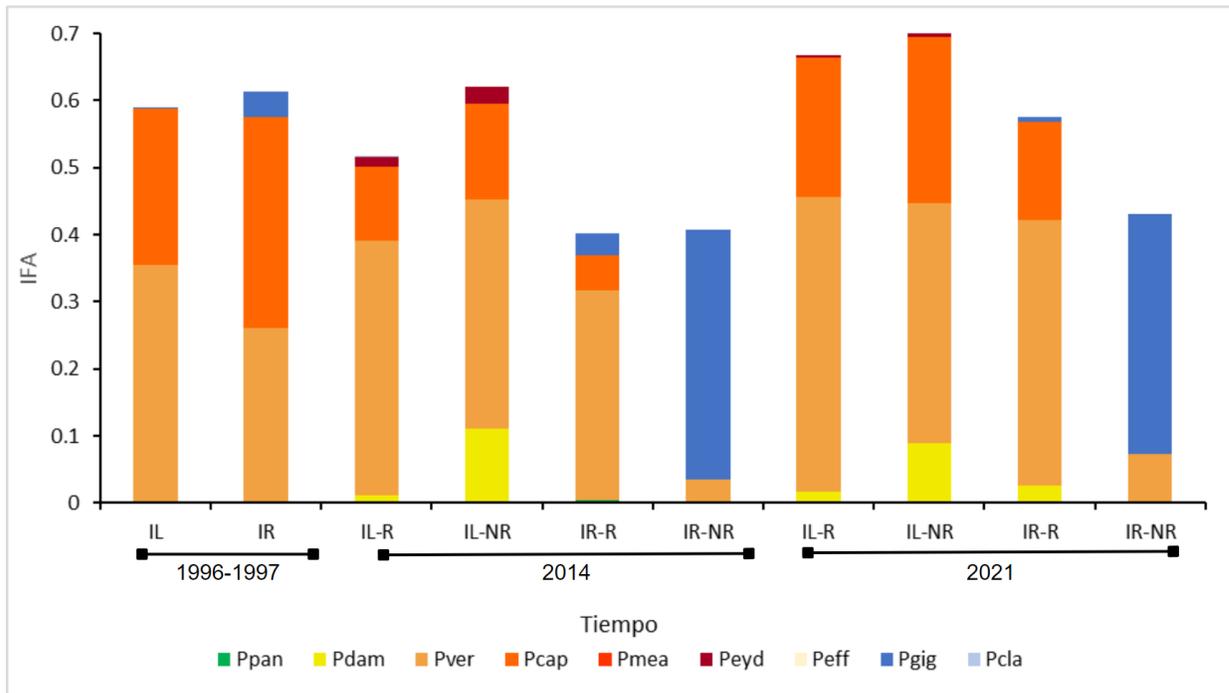


Figura 6. Valores de IFA calculados a partir de los datos de cobertura coralina reportados por Rodríguez-Zaragoza (2001), junto con los calculados en el presente estudio para 2014 y 2021, a nivel de islas: Isla Larga (IL), Isla Redonda (IR). Así como para ambas condiciones de estudio: transectos restaurados (R) y transectos no restaurados (NR). El patrón de colores representa a cada una de las especies registradas (*Porites panamensis* (Ppan), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora eydouxi* (Peyd), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora gigantea* (Pgig), *Pocillopora clavus* (Pcla)).

4.3 Aporte a la funcionalidad física por géneros coralinos

La alta y positiva correlación observada entre el IFA en los transectos R y la cobertura de *Pocillopora* en los tres niveles espaciales de estudio era de esperar, considerando que la restauración se llevó a cabo utilizando fragmentos de coral de este género. La selección de este género está respaldada por sus altos CF, lo que significa que contribuye significativamente a la funcionalidad física del arrecife debido a su complejidad estructural y altas tasas de calcificación. Aunado a que, estudios realizados en el POT revelan la resistencia del género frente a las anomalías térmicas, mostrando un crecimiento positivo y una alta supervivencia incluso en situaciones de estrés térmico (Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023b). A pesar de que

se considera uno de los géneros menos resistentes al estrés térmico en la región, *Pocillopora* también demuestra una mayor capacidad de recuperación a este mismo tipo de estrés, en comparación con otros géneros como *Pavona* y *Porites* (Cruz-García *et al.*, 2020). Es importante destacar que la falta de correlación en el sitio TA, entre el IFA y cualquiera de los tres géneros analizados, puede atribuirse a las condiciones desfavorables del sitio, lo que dificulta su recuperación en términos de IFA, a pesar de los esfuerzos de restauración realizados. Cada sitio presenta características ambientales específicas que pueden influir en la respuesta de los corales a los esfuerzos de restauración, por lo que resulta crucial considerar estos factores al implementar estrategias de restauración activa.

Resulta comprensible que la cobertura del género *Porites* no esté correlacionada de manera significativa con el IFA de los transectos R del PNIM, puesto que este género, específicamente en su forma incrustante, la cual se encuentra presente en el área de estudio, presentó la tasa de calcificación, índice de rugosidad y la altura promedio más bajas, resultando en el menor CF del PNIM. Por lo tanto, la contribución de *Porites* a la funcionalidad física de los arrecifes del Pacífico Mexicano es limitada (Cabra-Tena *et al.*, 2020).

El patrón de contribución de cada uno de los géneros al IFA en los transectos NR resultó interesante, ya que refleja principalmente las condiciones físicas de los sitios. En los sitios pertenecientes a Isla Larga, era de esperar la correlación del IFA con la cobertura de *Pocillopora*, dado que se ha reportado que esta isla presenta una mayor cobertura de dicho género (CONANP, 2007; Hernández-Zulueta *et al.*, 2017). Además, las profundidades en Isla Larga, que oscilan entre aproximadamente 3 y 5 metros (Sotelo-Casas *et al.*, 2016), permiten un mejor desarrollo de especies de corales de tipo ramificado, que es ideal para el crecimiento de *Pocillopora*. Por otro lado, en Isla Redonda, que presenta una profundidad mayor entre 4 y 9 metros (Sotelo-Casas *et al.*, 2016), favorece el desarrollo de especies de coral masivo, como las pertenecientes al género *Pavona*. Se ha reportado previamente que *Pavona* tiene una contribución a la funcionalidad física menor que los pocilopóridos, pero considerablemente mayor que *Porites* debido a su morfología (Cabra-Tena *et al.*, 2020; Muñoz-Alfaro *et al.*, en prensa). Por lo tanto, se podría esperar que, en los sitios de Isla Redonda, el IFA esté correlacionado con la cobertura de *Pavona*. Cabe señalar que los resultados a nivel de sitios se reflejan en los niveles espaciales más grandes, lo que explica por qué a nivel de PNIM en los transectos NR, el IFA esté correlacionado tanto con *Pocillopora* como con *Pavona*.

Con base en los resultados obtenidos a partir de los diferentes análisis realizados, resulta clara la evidencia de que las acciones de restauración llevadas a cabo en el PNIM están siendo efectivas, puesto que se está logrando recuperar no solo la CC, sino también la funcionalidad física del ecosistema arrecifal. Principalmente en aquellas áreas en las que tanto las condiciones ambientales, pero en mayor medida las

antrópicas, no permiten que las comunidades coralinas se recuperen naturalmente. Parte del éxito que está teniendo la restauración en el área de estudio, es la selección de fragmentos coralinos del género *Pocillopora*. De Bello *et al.* (2021), mencionan que la restauración actualmente debe de estar enfocada en lograr generar comunidades resilientes que puedan hacer frente a los cambios ambientales y perturbaciones tanto naturales como antrópicas. En el PNIM, la historia de vida del género *Pocillopora* demuestra una capacidad de resiliencia relacionada con una alta resistencia a estresores regionales, además de una alta tasa de crecimiento (Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2023b), por lo que se puede inferir que seguir utilizando este género con base en un enfoque funcional, para realizar acciones de restauración activa, puede resultar en el cumplimiento del objetivo principal del enfoque que proponen De Bello *et al.* (2021).

Capítulo 5. Conclusiones

El análisis de los cambios en la funcionalidad física a partir de los esfuerzos de restauración activa realizados en el PNIM entre 2014 y 2021 proporciona evidencia de que las acciones de restauración han sido efectivas. De manera general se observa un aumento significativo tanto en la cobertura de coral como en la funcionalidad física de los arrecifes en los transectos donde se llevaron a cabo acciones de restauración activa en comparación con aquellos sin restauración. Estos cambios son significativos y demuestran que las acciones de restauración están generando resultados positivos.

Además, gracias al esfuerzo de restauración activa, se ha logrado que en las zonas en donde las comunidades coralinas no pueden recuperarse de manera natural, la funcionalidad física alcance niveles similares a los históricos, anteriores a la presión intensa de actividades de origen antrópico como el turismo. Esto indica que las acciones de restauración activa están desempeñando un papel crucial en la recuperación de los ecosistemas coralinos.

La trayectoria de la funcionalidad física también muestra diferencias significativas entre los transectos restaurados y los no restaurados a lo largo de los años, especialmente en zonas donde los factores estresantes ambientales y antrópicos dificultan la recuperación natural de las comunidades coralinas, como en los sitios de Isla Redonda.

Es importante destacar que, aunque los transectos en Isla Larga no mostraron diferencias en la funcionalidad física entre los restaurados y los no restaurados, las comunidades coralinas en esta área tienen una capacidad de recuperación natural similar a la asistida. Esta capacidad se atribuye en parte a las condiciones físicas propias de la isla, pero también es resultado de las acciones de manejo realizadas en el PNIM como, por ejemplo, el cierre del área algunos días y la restricción de visitantes por día con base en el estudio de capacidad de carga realizado por Cupul-Magaña & Rodríguez-Troncoso (2017). Por lo tanto, es fundamental continuar implementando medidas proactivas para proteger el ecosistema arrecifal del parque.

Es relevante mencionar que el éxito de la restauración en el PNIM está relacionado con el uso de fragmentos de oportunidad del género *Pocillopora*, ya que este género demostró una estrecha correlación con el aumento de la funcionalidad física. Las especies que componen este género presentan coeficientes funcionales más altos debido a su elevada complejidad estructural y alta tasa de calcificación en comparación con las especies de forma masiva (*Pavona* spp.) o incrustante (*Porites* spp.). Por lo tanto,

utilizar al género *Pocillopora* para las acciones de restauración activa en la zona, es una estrategia efectiva para garantizar la recuperación de la funcionalidad física del ecosistema.

Es importante tener en cuenta que este estudio ofrece una visión a largo plazo de la restauración desde una perspectiva funcional. Sin embargo, dado que el análisis se realizó solo hasta 2021, es fundamental continuar monitoreando la trayectoria de las comunidades coralinas bajo este enfoque. Esto nos permitirá comprender de manera más completa cómo se desarrolla la funcionalidad física frente a presiones ambientales como, por ejemplo el fenómeno El Niño que se presenta en el 2023.

Literatura citada

- Allemand, D., & Osborn, D. (2019). Ocean acidification impacts on coral reefs: From sciences to solutions. *Regional Studies in Marine Science*, 28, 100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.risma.2019.100558>
- Alvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proc Biol Sci*, 276(1669), 3019-3025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0339>
- Alvarez-Filip, L., Dulvy, N., M Côté, I., Watkinson, A., & Gill, J. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications*, 21, 2223-2234. <https://doi.org/10.2307/41416650>
- Alvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J. P., Horta-Puga, G., & Iglesias-Prieto, R. (2013). Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific Reports*, 3, 5. <https://doi.org/10.1038/srep03486>
- Bayraktarov, E., Banaszak, A. T., Montoya Maya, P., Kleypas, J., Arias-González, J. E., Blanco, M., Calle-Triviño, J., Charuvi, N., Cortés-Useche, C., Galván, V., García Salgado, M. A., Gnecco, M., Guendulain-García, S. D., Hernández Delgado, E. A., Marín Moraga, J. A., Maya, M. F., Mendoza Quiroz, S., Mercado Cervantes, S., Morikawa, M., Nava, G., Pizarro, V., Sellares-Blasco, R. I., Suleimán Ramos, S. E., Villalobos Cubero, T., Villalpando, M. F., & Frías-Torres, S. (2020). Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories. *PLOS ONE*, 15(8), e0228477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228477>
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P. J., Vardi, T., & McLeod, I. M. (2020). Coral restoration - A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLOS ONE*, 15(1), e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Burke, L., Reyttar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/reefs-risk-revisited>
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Alvarez-Filip, L., González-Barrios, F. J., Calderon-Aguilera, L. E., & Aparicio-Cid, C. (2020). Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract. *Ecological Indicators*, 119, 726-734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106795>
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Reyes-Bonilla, H., Calderon-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Cupul-Magaña, A., Rodríguez-Troncoso, A. P., & Ayala-Bocos, A. (2018). Calcification of coral assemblages in the eastern Pacific: Reshuffling calcification scenarios under climate change. *Ecological Indicators*, 95, 726-734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.021>
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Alvarez-Filip, L., González-Barrios, F. J., Calderon-Aguilera, L. E., & Aparicio-Cid, C. (2020). Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract. *Ecological Indicators*, 119, 726-734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106795>

- Carriquiry, J., Cupul-Magaña, A., Rodríguez Zaragoza, F., & Medina-Rosas, P. (2001). Coral bleaching and mortality in the Mexican Pacific during the 1997–98 El Niño and Prediction from a remote sensing approach. *Bulletin of Marine Science*, 69, 237-249. https://www.researchgate.net/publication/233507173_Coral_bleaching_and_mortality_in_the_Mexican_Pacific_during_the_1997-98_El_Niño_and_Prediction_from_a_remote_sensing_approach
- CONANP-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2007). *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Islas Marietas*. México, D. F.: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/27_libro_pm.pdf
- Cruz-García, R., Rodríguez-Troncoso, A., Rodríguez Zaragoza, F., Mayfield, A., & Cupul-Magaña, A. (2020). Ephemeral effects of El Niño–Southern Oscillation events on an eastern tropical Pacific coral community. *Marine and Freshwater Research*, 71. <https://doi.org/10.1071/MF18481>
- Cupul-Magaña, A., Aranda-Mena, O. S., Medina-Rosas, P., & Vizcaíno-choa, V. (2000). Comunidades coralinas de las islas Marietas, Bahía de Banderas. *Mexico*, 1, 15-22. https://www.researchgate.net/publication/297711560_Comunidades_coralinas_de_las_islas_Marietas_Bahia_de_Banderas
- Cupul-Magaña, A., & Rodríguez-Troncoso, A. (2017). Tourist carrying capacity at Islas Marietas National Park: An essential tool to protect the coral community. *Applied Geography*, 88, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.08.021>
- Darling, E. S., Alvarez-Filip, L., Oliver, T. A., McClanahan, T. R., & Côté, I. M. (2012). Evaluating life-history strategies of reef corals from species traits. *Ecology Letters*, 15(12), 1378-1386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01861.x>
- De Bello, F., Carmona, C. P., Dias, A. T. C., Götzenberger, L., Moretti, M., & Berg, M. P. (2021). *Handbook of Trait-Based Ecology: From Theory to R Tools*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/9781108628426>
- De Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodríguez, L. C., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Estrada-Saldivar, N., Jordán-Dalhgren, E., Rodríguez-Martínez, R., Perry, C., & Alvarez-Filip, L. (2019). Functional consequences of the long-term decline of reef-building corals in the Caribbean: evidence of across-reef functional convergence. *Royal Society Open Science*, 6, 1-15. <https://doi.org/10.1098/rsos.190298>
- Figueroa-Camacho, A., & Nava, H. (2015). Rehabilitación de la cobertura de corales del género Pocillopora (Lamarck 1816) usando una técnica adaptada a hábitats rocosos sublitorales. *Biológicas*, 17(1), 31. https://www.researchgate.net/publication/314281331_Rehabilitacion_de_la_cobertura_de_corales_del_genero_Pocillopora_Lamarck_1816_usando_una_tecnica_adaptada_a_habitats_rocosos_sublitorales
- Gardner, T. A., Côté, I. M., Gill, J. A., Grant, A., & Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301(5635), 958-960. <https://doi.org/10.1126/science.1086050>

- Glynn, P., Manzello, D., & Enochs, I. (2017). *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4>
- Goergen, E. A., Schopmeyer, S., Moulding, A. L., Moura, A., Kramer, P., & Viehman, T. S. (2020). Coral reef restoration monitoring guide: Methods to evaluate restoration success from local to ecosystem scales. <https://doi.org/https://doi.org/10.25923/xndz-h538>
- González-Barrios, F. J., & Álvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators*, *95*, 877-886. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.038>
- González-Barrios, F. J., Cabral-Tena, R. A., & Alvarez-Filip, L. (2021). Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*, *27*(3), 640-651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.15431>
- Harriott, V. (2004). Marine tourism impacts on the Great Barrier Reef. *Tourism in Marine Environments*, *1*, 29-40. <https://doi.org/10.3727/154427304774865850>
- Hein, M. Y., Willis, B. L., Beeden, R., & Birtles, A. (2017). The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs. *Restoration Ecology*, *25*(6), 873-883. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/rec.12580>
- Hein, M. Y., Vardi, T., Shaver, E. C., Pioch, S., Boström-Einarsson, L., Ahmed, M., Grimsditch, G., & McLeod, I. M. (2021). Perspectives on the Use of Coral Reef Restoration as a Strategy to Support and Improve Reef Ecosystem Services [Policy and Practice Reviews]. *Frontiers in Marine Science*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.618303>
- Hernández-Zulueta, J., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Araya, R., Vargas-Ponce, O., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., Díaz-Pérez, L., Ríos-Jara, E., & Ortiz, M. (2017). Multi-scale analysis of hermatypic coral assemblages at Mexican Central Pacific. *Scientia Marina*, *81*(1), 91-102. <https://doi.org/10.3989/scimar.04371.12A>
- Hooper, D., Chapin Iii, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A., J.J. V., & Wardle, D. (2005). Effects Of Biodiversity On Ecosystem Functioning: A Consensus Of Current Knowledge. *Ecological Monographs*, *75*, 3-35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Jax, K. (2005). Function and “functioning” in ecology: what does it mean? *Oikos*, *111*(3), 641-648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x>
- Kessler, W. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*, 181-217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Lenhard, W., & Lenhard, A. (2014). *Testing the Significance of Correlations*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2954.1367>
- López-Pérez, R. A., Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., Carriquiry, J. D., Medina-Rosas, P., Cupul-Magaña, A. L., Herrero-Pérezrul, M. D., Hernández-Ramírez, H. A., Ahumada-Sempoal, M. Á., & Luna-Salguero, B. M. (2012). Coral communities and reefs from Guerrero, Southern Mexican Pacific. *Marine Ecology*, *33*(4), 407-416. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2011.00505.x>

- Manzello, D. P. (2010). Ocean acidification hotspots: Spatiotemporal dynamics of the seawater CO₂ system of eastern Pacific coral reefs. *Limnology and Oceanography*, 55(1), 239-248. <https://doi.org/https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0239>
- Manzello, D. P., Mark Eakin, C., & Glynn, P. W. (2017). Effects of Global Warming and Ocean Acidification on Carbonate Budgets of Eastern Pacific Coral Reefs. In P. W. Glynn, D. P. Manzello, & I. C. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment* (pp. 517-533). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_18
- Martínez-Castillo, V., Rodríguez-Troncoso, A. P., Santiago-Valentín, J. D., & Cupul-Magaña, A. L. (2020). The influence of urban pressures on coral physiology on marginal coral reefs of the Mexican Pacific. *Coral Reefs*, 39(3), 625-637. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01957-z>
- Martínez-Castillo, V., Rodríguez-Troncoso, A. P., Mayfield, A. B., Rodríguez-Zaragoza, F. A., & Cupul-Magaña, A. L. (2022). Coral Recovery in the Central Mexican Pacific 20 Years after the 1997–1998 El Niño Event. *Oceans*, 3(1), 48-59. <https://www.mdpi.com/2673-1924/3/1/5>
- Monty, J. A., Gilliam, D. S., Banks, K., Stout, D. K., & Dodge, R. (2006). Coral of opportunity survivorship and the use of coral nurseries in coral reef restoration. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium.*, 1665-1673. https://nsuworks.nova.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1030&context=occ_facpresentations
- Mouillot, D., Graham, N. A. J., Villéger, S., Mason, N. W. H., & Bellwood, D. R. (2013). A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(3), 167-177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.004>
- Muñoz-Alfaro, A., A.P., Rodríguez-Troncoso, A.L., Cupul-Magaña, J. de J.A., Tortolero-Langarica & R.A., Cabral-Tena (en prensa). Evaluación de la restauración active mediante el índice de función arrecifal en arrecifes del Parque Nacional Islas Marietas. *Hidrobiológica*.
- Norström, A. V., Nyström, M., Lokrantz, J., & Folke, C. (2009). Alternative states on coral reefs: beyond coral-macroalgal phase shifts. *Mar Ecol Prog Ser*, 376, 295-306. <https://doi.org/https://doi.org/10.3354/meps07815>
- Palacios-Hernández, E., Carrillo, L. E., Filonov, A., Brito-Castillo, L., & Cabrera-Ramos, C. E. (2010). Seasonality and anomalies of sea surface temperature off the coast of Nayarit, Mexico. *Ocean Dynamics*, 60(1), 81-91. <https://doi.org/10.1007/s10236-009-0244-z>
- Pérez de-Silva, C. V., Cupul-Magaña, A. L., Rodríguez-Troncoso, A. P., & Rodríguez-Zaragoza, F. A. (2022). Reef Fish Assemblage in Two Insular Zones within the Mexican Central Pacific. *Oceans*, 3(2), 204-217. <https://www.mdpi.com/2673-1924/3/2/15>
- Perry, C. T., & Alvarez-Filip, L. (2018). Changing geo-ecological functions of coral reefs in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 976-988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2435.13247>
- Reyes-Bonilla, H., Calderon-Aguilera, L., Cruz-Piñón, G., Medina-Rosas, P., Pérez, R. A., Herrero, M., Leyte-Morales, G., Cupul-Magaña, A., & Carriquiry, J. (2005). *Atlas de Corales Pétreos (Anthozoa: Scleractinia) del Pacífico Mexicano*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

<https://www.researchgate.net/publication/242014135> Atlas de Corales Petreos Anthozoa Scleractinia del Pacifico Mexicano

- Rinkevich, B. (2020). Ecological engineering approaches in coral reef restoration. *ICES Journal of Marine Science*, 78. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa022>
- Rodríguez-Troncoso, A. P., Tortolero-Langarica, J. J. A., Padilla-Guzmán, R., Kelly-Gutiérrez, L. D., & Cupul-Magaña, A. L. (2023)a. Spatio-temporal variation in the growth of coral fragments of opportunity in the Eastern Tropical Pacific: implications for coral reef restoration. *Revista de biología tropical*, 71(S1), e54850. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71iS1.54850>
- Rodríguez-Troncoso, A., Tortolero-Langarica, J. J. A., Medellín-López, P., Canizales-Flores, H., Domínguez, E., & Cupul-Magaña, A. (2023)b. Evaluación de los indicadores demográficos de Pocillopora (Scleractinia: Pocilloporidae) en sitios insulares vs. costeros: implicaciones para un programa de restauración regional. *Revista de biología tropical*, 71, e54790. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71iS1.54790>
- Rodríguez-Zaragoza, F. A. (2001). *Estructura de las comunidades de coral hermatípico del Pacifico Nortropical mexicano* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma de Baja California.
- Robles-Payán, A., Reyes-Bonilla, H., & Cáceres-Martínez, C. (2021). Crecimiento y supervivencia de corales durante la fase inicial de cultivo en La Paz, Baja California Sur, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 92(2021), 11. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532021000100207&nrm=iso
- Romero-Torres, M., Acosta, A., Palacio-Castro, A. M., Trembl, E. A., Zapata, F. A., Paz-García, D. A., & Porter, J. W. (2020). Coral reef resilience to thermal stress in the Eastern Tropical Pacific. *Global Change Biology*, 26(7), 3880-3890. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.15126>
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. (2017). The Defining Characteristics of ENSO Extremes and the Strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017RG000560>
- Sotelo-Casas, R. C., Cupul-Magaña, A. L., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Solís-Marín, F. A., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2016). Structural and environmental effects on an assemblage of echinoderms associated with a coral community. *Marine Biodiversity*, 48(3), 1401-1411. <https://doi.org/10.1007/s12526-016-0622-y>
- Souter, D., Wicquart, J., Logan, M., Obura, D., & Staub, F. (2021). *Status of coral reefs of the world: 2020 report*. GCRMNG & ICRI. <https://www.unep.org/resources/status-coral-reefs-world-2020>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Cupul-Magaña, A. L., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2014). Restoration of a degraded coral reef using a natural remediation process: A case study from a Central Mexican Pacific National Park. *Ocean & Coastal Management*, 96, 12-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.020>
- Tortolero-Langarica, J. d. J. A., Cupul-Magaña, A. L., Carricart-Ganivet, J. P., Mayfield, A. B., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2016). Differences in Growth and Calcification Rates in the Reef-Building Coral *Porites lobata*: The Implications of Morphotype and Gender on Coral Growth [Original Research]. *Frontiers in Marine Science*, 3(179), 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00179>

- Tortolero-Langarica, J. J. A., Carricart-Ganivet, J. P., Cupul-Magaña, A. L., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2017). Historical insights on growth rates of the reef-building corals *Pavona gigantea* and *Porites panamensis* from the Northeastern tropical Pacific. *Marine Environmental Research*, 132, 23-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.10.004>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., Alarcón-Ortega, L. C., & Santiago-Valentín, J. D. (2019). Accelerated recovery of calcium carbonate production in coral reefs using low-tech ecological restoration. *Ecological Engineering*, 128, 89-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.002>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., & Rinkevich, B. (2020). Micro-Fragmentation as an Effective and Applied Tool to Restore Remote Reefs in the Eastern Tropical Pacific. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6574. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/18/6574>
- Vaughan, D. (Ed.). (2021). *Active coral restoration: Techniques for a changing planet*. J. Ross Publishing.
- Veron, J. E. N. (2000). *Corals of the World* (Vol. 1). Australian Institute of Marine Science.
- Veron J.E.N., Stafford-Smith M.G., Turak E., & L.M., D. (2022). *Corals of the World*. <http://www.coralsoftheworld.org/page/home/>
- Westoby, R., Becken, S., & Laria, A. P. (2020). Perspectives on the human dimensions of coral restoration. *Regional Environmental Change*, 20(4), 109. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01694-7>
- White, P. S., & Pickett, S. T. A. (1985). Chapter 1 - Natural Disturbance and Patch Dynamics: An Introduction. In S. T. A. Pickett & P. S. White (Eds.), *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (pp. 3-13). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-554520-4.50006-X>
- Woodhead, A., Hicks, C., Norström, A., Williams, G., & Graham, N. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13331>

Anexo A

Tabla 10. Resultados de las pruebas t de Student realizadas para saber si existen diferencias significativas entre los promedios de la CC y el IFA de ambas condiciones de estudio (R y NR), así como la comprobación de supuestos.

	Cobertura Coralina		Índice de Función Arrecifal	
	Resultados t de Student	Supuestos	Resultados t de Student	Supuestos
PNIM	t-valor= -5.19 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= 0.91 p-valor > 0.05	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Isla Larga	t-valor= -9.73 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -10.62 p-valor <0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Isla Redonda	t-valor= 4.18 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= 7.49 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Cueva del Muerto	t-valor= -9.08 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -9.03 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Zona de Restauración Sur	t-valor= -1.54 p-valor > 0.05	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -3.60 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Zona de Restauración	t-valor= -6.36 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -6.16 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Túnel Amarradero	t-valor= 0.96 p-valor > 0.05	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -0.47 p-valor > 0.05	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Plataforma Pavonas	t-valor= -8.02 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= -4.62 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05
Playa del Amor	t-valor= 9.13 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05	t-valor= 13.14 p-valor < 0.001	Normalidad= TLC Homocedasticidad = p<0.05

Anexo B

Tabla 11. Promedios de la cobertura coralina (%CC) y el Índice de Función Arrecifal (IFA) de todas las escalas espaciales (parque, islas y sitios), a lo largo de los años de estudio.

	2014		2015		2016		2017	
	R	NR	R	NR	R	NR	R	NR
PNIM	IFA: 0.418 ± 0.149 %CC: 10.011 ± 7.516	IFA: 0.460 ± 0.185 %CC: 15.133 ± 14.270	IFA: 0.449 ± 0.152 %CC: 10.772 ± 6.697	IFA: 0.486 ± 0.199 %CC: 17.442 ± 16.250	IFA: 0.457 ± 0.137 %CC: 10.944 ± 8.473	IFA: 0.449 ± 0.228 %CC: 15.733 ± 14.905	IFA: 0.484 ± 0.143 %CC: 13.011 ± 8.986	IFA: 0.478 ± 0.157 %CC: 14.333 ± 12.272
IL	IFA: 0.482 ± 0.128 %CC: 12.792 ± 7.790	IFA: 0.595 ± 0.111 %CC: 23.952 ± 16.251	IFA: 0.538 ± 0.068 %CC: 14.969 ± 5.667	IFA: 0.629 ± 0.115 %CC: 28.452 ± 17.222	IFA: 0.518 ± 0.133 %CC: 15.396 ± 8.891	IFA: 0.620 ± 0.106 %CC: 26.500 ± 13.296	IFA: 0.552 ± 0.100 %CC: 17.792 ± 8.996	IFA: 0.614 ± 0.073 %CC: 23.738 ± 10.598
IR	IFA: 0.345 ± 0.143 %CC: 6.833 ± 6.239	IFA: 0.343 ± 0.154 %CC: 7.417 ± 6.907	IFA: 0.346 ± 0.161 %CC: 5.976 ± 4.108	IFA: 0.360 ± 0.172 %CC: 7.771 ± 7.156	IFA: 0.388 ± 0.111 %CC: 5.857 ± 4.325	IFA: 0.298 ± 0.198 %CC: 6.313 ± 8.687	IFA: 0.405 ± 0.150 %CC: 7.548 ± 5.355	IFA: 0.360 ± 0.103 %CC: 6.104 ± 6.253
CM	IFA: 0.406 ± 0.152 %CC: 6.667 ± 6.128	IFA: 0.556 ± 0.103 %CC: 17.833 ± 9.305	IFA: 0.459 ± 0.028 %CC: 8.500 ± 1.414	IFA: 0.601 ± 0.122 %CC: 23.667 ± 15.169	IFA: 0.439 ± 0.173 %CC: 9.250 ± 9.310	IFA: 0.592 ± 0.136 %CC: 23.222 ± 15.526	IFA: 0.486 ± 0.078 %CC: 9.583 ± 5.068	IFA: 0.579 ± 0.070 %CC: 18.833 ± 7.970
ZRS	IFA: 0.474 ± 0.176 %CC: 12.778 ± 10.403	IFA: 0.526 ± 0.060 %CC: 13.167 ± 4.007	IFA: 0.551 ± 0.081 %CC: 16.278 ± 6.866	IFA: 0.544 ± 0.014 %CC: 14.750 ± 1.768	IFA: 0.492 ± 0.172 %CC: 14.000 ± 11.461	IFA: 0.573 ± 0.084 %CC: 18.417 ± 8.132	IFA: 0.535 ± 0.146 %CC: 17.722 ± 12.327	IFA: 0.642 ± 0.012 %CC: 26.083 ± 2.711
ZR	IFA: 0.541 ± 0.064 %CC: 16.889 ± 4.762	IFA: 0.721 ± 0.067 %CC: 43.917 ± 15.910	IFA: 0.578 ± 0.023 %CC: 17.972 ± 2.514	IFA: 0.757 ± 0.001 %CC: 49.333 ± 0.236	IFA: 0.595 ± 0.040 %CC: 20.889 ± 4.001	IFA: 0.710 ± 0.017 %CC: 39.500 ± 3.300	IFA: 0.615 ± 0.014 %CC: 23.333 ± 2.242	IFA: 0.639 ± 0.122 %CC: 28.750 ± 20.153
TA	IFA: 0.286 ± 0.146 %CC: 4.000 ± 0.707	IFA: 0.373 ± 0.154 %CC: 7.667 ± 0.154	IFA: 0.273 ± 0.221 %CC: 3.833 ± 2.828	IFA: 0.335 ± 0.189 %CC: 6.722 ± 0.154	IFA: 0.358 ± 0.120 %CC: 4.167 ± 3.300	IFA: 0.275 ± 0.021 %CC: 1.944 ± 0.631	IFA: 0.296 ± 0.250 %CC: 5.167 ± 4.478	IFA: 0.364 ± 0.037 %CC: 4.722 ± 1.873
PP	IFA: 0.297 ± 0.150 %CC: 4.944 ± 2.084	IFA: 0.478 ± 0.052 %CC: 13.583 ± 5.068	IFA: 0.323 ± 0.177 %CC: 5.167 ± 3.087	IFA: 0.523 ± 0.005 %CC: 17.250 ± 1.296	IFA: 0.339 ± 0.118 %CC: 3.833 ± 2.963	IFA: 0.546 ± 0.031 %CC: 19.917 ± 4.596	IFA: 0.443 ± 0.086 %CC: 7.889 ± 4.338	IFA: 0.499 ± 0.055 %CC: 15.333 ± 4.714
PA	IFA: 0.475 ± 0.094 %CC: 12.500 ± 11.549	IFA: 0.222 ± 0.127 %CC: 3.056 ± 1.735	IFA: 0.455 ± 0.088 %CC: 9.333 ± 6.364	IFA: 0.275 ± 0.170 %CC: 2.500 ± 1.922	IFA: 0.492 ± 0.035 %CC: 10.583 ± 4.596	IFA: 0.157 ± 0.217 %CC: 1.611 ± 2.507	IFA: 0.456 ± 0.153 %CC: 9.417 ± 9.782	IFA: 0.263 ± 0.23 %CC: 1.333 ± 0.167

Tabla 12. Promedios de la cobertura coralina (%CC) y el Índice de Función Arrecifal (IFA) de todas las escalas espaciales (parque, islas y sitios), a lo largo de los años de estudio (continuación).

	2018		2019		2020		2021	
	R	NR	R	NR	R	NR	R	NR
PNIM	IFA: 0.481 ± 0.15 %CC: 13.1 ± 8.63	IFA: 0.496±0.19 %CC: 19.2±17.45	IFA: 0.535±0.15 %CC: 18.7±11.16	IFA: 0.513±0.18 %CC: 19.9±16.27	IFA: 0.557±0.12 %CC: 20.0±13.13	IFA: 0.532±0.18 %CC: 21.7±17.1	IFA: 0.587±0.15 %CC: 25.3±16.29	IFA: 0.511±0.21 %CC: 22.0±19.60
IL	IFA: 0.527 ± 0.125 %CC: 16.188 ± 8.914	IFA: 0.653 ± 0.094 %CC: 31.952 ± 16.145	IFA: 0.590 ± 0.115 %CC: 23.333 ± 11.244	IFA: 0.664 ± 0.070 %CC: 32.810 ± 12.599	IFA: 0.610 ± 0.103 %CC: 25.313 ± 12.470	IFA: 0.687 ± 0.068 %CC: 36.143 ± 11.197	IFA: 0.638 ± 0.133 %CC: 31.313 ± 17.719	IFA: 0.689 ± 0.084 %CC: 37.595 ± 15.980
IR	IFA: 0.429 ± 0.165 %CC: 9.762 ± 7.445	IFA: 0.359 ± 0.143 %CC: 8.135 ± 9.097	IFA: 0.472 ± 0.161 %CC: 13.452 ± 9.062	IFA: 0.380 ± 0.380 %CC: 8.708 ± 9.159	IFA: 0.496 ± 0.123 %CC: 13.952 ± 11.845	IFA: 0.395 ± 0.120 %CC: 9.125 ± 9.364	IFA: 0.529 ± 0.163 %CC: 18.381 ± 12.206	IFA: 0.355 ± 0.164 %CC: 8.438 ± 9.809
CM	IFA: 0.456 ± 0.0499 %CC: 7.833 ± 2.828	IFA: 0.629 ± 0.103 %CC: 27.556 ± 14.494	IFA: 0.553 ± 0.083 %CC: 16.250 ± 8.367	IFA: 0.650 ± 0.052 %CC: 29.611 ± 9.013	IFA: 0.507 ± 0.087 %CC: 12.333 ± 7.307	IFA: 0.669 ± 0.104 %CC: 34.111 ± 16.847	IFA: 0.556 ± 0.110 %CC: 16.667 ± 11.785	IFA: 0.644 ± 0.091 %CC: 29.500 ± 13.757
ZRS	IFA: 0.474 ± 0.176 %CC: 16.889 ± 12.715	IFA: 0.586 ± 0.004 %CC: 19.167 ± 12.021	IFA: 0.560 ± 0.177 %CC: 22.167 ± 15.446	IFA: 0.612 ± 0.087 %CC: 23.167 ± 12.021	IFA: 0.620 ± 0.128 %CC: 27.056 ± 15.952	IFA: 0.677 ± 0.038 %CC: 32.917 ± 5.539	IFA: 0.597 ± 0.176 %CC: 26.333 ± 19.262	IFA: 0.663 ± 0.010 %CC: 29.917 ± 1.286
ZR	IFA: 0.594 ± 0.023 %CC: 21.056 ± 2.524	IFA: 0.755 ± 0.008 %CC: 51.333 ± 2.357	IFA: 0.644 ± 0.063 %CC: 29.222 ± 8.044	IFA: 0.737 ± 0.005 %CC: 47.250 ± 3.418	IFA: 0.670 ± 0.025 %CC: 32.222 ± 4.302	IFA: 0.725 ± 0.029 %CC: 42.417 ± 6.482	IFA: 0.732 ± 0.047 %CC: 46.056 ± 8.979	IFA: 0.782 ± 0.027 %CC: 57.417 ± 7.189
TA	IFA: 0.284 ± 0.233 %CC: 4.417 ± 3.418	IFA: 0.346 ± 0.094 %CC: 5.167 ± 3.032	IFA: 0.335 ± 0.264 %CC: 8.750 ± 5.539	IFA: 0.368 ± 0.094 %CC: 6.000 ± 3.786	IFA: 0.380 ± 0.115 %CC: 5.833 ± 4.243	IFA: 0.350 ± 0.097 %CC: 5.056 ± 3.405	IFA: 0.378 ± 0.261 %CC: 9.333 ± 8.957	IFA: 0.236 ± 0.147 %CC: 3.333 ± 3.905
PP	IFA: 0.428 ± 0.104 %CC: 7.444 ± 4.084	IFA: 0.557 ± 0.016 %CC: 22.250 ± 3.182	IFA: 0.502 ± 0.079 %CC: 12.333 ± 7.248	IFA: 0.557 ± 0.016 %CC: 22.667 ± 3.536	IFA: 0.498 ± 0.067 %CC: 11.667 ± 4.746	IFA: 0.567 ± 0.000 %CC: 23.917 ± 1.061	IFA: 0.553 ± 0.060 %CC: 16.722 ± 5.796	IFA: 0.564 ± 0.018 %CC: 23.750 ± 3.418
PA	IFA: 0.575 ± 0.056 %CC: 18.583 ± 7.660	IFA: 0.240 ± 0.048 %CC: 1.667 ± 0.441	IFA: 0.564 ± 0.128 %CC: 19.833 ± 15.085	IFA: 0.275 ± 0.089 %CC: 2.111 ± 1.388	IFA: 0.607 ± 0.128 %CC: 25.500 ± 19.092	IFA: 0.327 ± 0.039 %CC: 3.333 ± 0.882	IFA: 0.643 ± 0.101 %CC: 29.917 ± 17.560	IFA: 0.335 ± 0.081 %CC: 3.333 ± 1.740