



UNIVERSIDAD MARÍTIMA INTERNACIONAL DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
ESCUELA DE RECURSOS MARINOS Y AMBIENTALES

**RESTAURACIÓN DE CORALES PÉTREOS (ACROPORA CERVICORNIS)
MEDIANTE LA TÉCNICA TECNOLOGÍA DE ACRECIÓN DE MINERALES
Y CEMENTO MARINO EN EL PARQUE NACIONAL PORTOBELO, COLÓN**

TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA MARINA

Presentado por:

EVELYN ELIZABETH SÁENZ CASTILLO

7-711-2022

FECHA: _____



HOJA DE APROBACIÓN

Aprobado por:

DECANO DE LA FACULTAD

Fecha:

DEDICATORIA

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional desde el primer día hasta el último, por animarme a seguir adelante y creer en mi capacidad de lograrlo. A la profesora Yessenia, por sus enseñanzas desde las tempranas etapas de mi carrera, por sus consejos y por confiar en mí para este proyecto. A mis amigos y compañeros Andrés Gotti, Diego Valladares, Juan Carrera y Nemesio Melo, quienes siempre estuvieron en mis salidas de monitoreo, con ánimos de ayudar y aportar lo mejor de sí mismos. También a mi compañera Sara Espinosa, quien hizo de mi carrera universitaria un mejor lugar.

AGRADECIMIENTO

A Rene Gómez por brindar el apoyo para que esta investigación fuera posible dentro del proyecto Reef2Reef Restoration. A los compañeros y colegas que participaron en los monitoreos y limpiezas de las estructuras. También quiero agradecer a la profesora Yehudi Rodríguez Ariatti quien me ayudó al inicio del proyecto, dándome ideas para la toma de datos, a la secretaria Madeleine Bethancourt, por siempre estar ahí y brindarme su soporte en la organización de salidas de campo. Al personal de Scuba Portobelo, quienes siempre estuvieron al pendiente de nosotros en los monitoreos.

ÍNDICE

HOJA DE APROBACIÓN.....	2
DECANO DE LA FACULTAD	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO	4
INDICE.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
OBJETIVOS.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	20
2.1 Área geográfica de estudio	21
2.2 Tipos de estructuras, funcionalidad e instalación.....	22
2.3 Fragmentación inicial y trasplante en las estructuras	25
2.4 Toma de datos de crecimiento en <i>Acropora cervicornis</i>	26

2.5 Toma de parámetros oceanográficos	28
2.6 Registro del muestreo	28
2.7 Observación de especies asociadas	29
CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	30
3.0 Análisis del crecimiento de los fragmentos	31
3.1 Análisis de longitud total de los fragmentos de <i>Acropora cervicornis</i> por tipo de estructura.....	31
3.2 Análisis de número promedio de nuevas ramificaciones de los fragmentos de <i>Acropora cervicornis</i> por tipo de estructura.	36
3.3 Análisis de longitud de ramificaciones de los fragmentos de <i>Acropora cervicornis</i> por tipo de estructura.....	42
3.4 Análisis de la efectividad de la tecnología MAT (Mineral Accretion Technology)	48
3.5 Análisis de parámetros oceanográficos	49
3.6 Identificación y estado de las especies asociadas a las estructuras	52
3.7 Comparación de viabilidad entre las estructuras estudiadas	53
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	57
CAPÍTULO V. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA Y ANEXOS BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Datos utilizados en la prueba estadística u de mann whitney para comparar longitud total promedio para estructuras con MAT.....	35
CUADRO 2. Datos utilizados en la prueba estadística u de mann whitney para comparar el numero promedio de nuevas ramificaciones para estructuras con MAT.....	40
CUADRO 3. datos utilizados en la prueba estadística u de mann whitney para comparar longitud promedio de las ramificaciones en estructuras con MAT. ..	46
CUADRO 4. Promedios obtenidos de los parámetros oceanográficos estudiados.	51
CUADRO 5. Especies asociadas a las distintas estructuras a lo largo de los meses de investigación.	53
CUADRO 6. Comparación de viabilidad entre las estructuras estudiadas.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Vista aérea del área de estudio y ubicación en la costa de colón, zona de bahía huertas. mapa por luis bernal.	21
FIGURA 2. Vista de fondo marino arenoso/rocoso en la zona de bahía huertas, parque nacional portobelo, colón.....	22
FIGURA 3. Ubicación de las seis estructuras estudiadas con fragmentos de corales dentro de la bahía huertas.	23
FIGURA 4. Estructura tipo mini dome con fragmentos de coral adheridos.....	23
FIGURA 5. Estructura tipo endless reef con fragmentos de coral adheridos. ..	24
FIGURA 6. Estructura tipo reef ball con corales adheridos.....	25
FIGURA 7. Bases de cemento en fragmentos.....	26
FIGURA 8. Fragmento r-3 de la estructura reef ball, con su etiqueta y color correspondiente.....	29
FIGURA 9. Longitud total promedio de los fragmentos en los distintos tipos de estructura. representados de forma lineal de acuerdo con su crecimiento, durante los meses de abril hasta septiembre del año 2021.....	32
FIGURA 10. Valores críticos para la prueba de mann-whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para longitud total entre endless reef y mini dome.....	35

FIGURA 11. Gráfica de dispersión del análisis estadístico u de mann whitney para longitud total promedio de los fragmentos de acropora cervicornis en estructuras con mat.	36
FIGURA 12. Gráfica de números promedio de nuevas ramificaciones de acropora cervicornis observadas durante los seis meses de estudio.	37
FIGURA 13. Valores críticos para la prueba de mann-whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para número promedio de nuevas ramificaciones entre Endless Reef y Mini Dome.	40
FIGURA 14. Gráfica de valores promedio de crecimiento de nuevas ramificaciones de acropora cervicornis mediante el uso de estructuras mini dome y endless reef con MAT.	41
FIGURA 15. Gráfica de desviación estándar para nuevas ramificaciones de coral.	42
FIGURA 16. Gráfica de longitud promedio de ramificaciones por estructuras. el cuadro de meses representa la sumatoria mensual de longitud de ramificaciones y la gráfica representa el crecimiento lineal.	44
FIGURA 17. Valores críticos para la prueba de mann-whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para longitud promedio de ramificaciones entre endless reef y mini dome.	46
FIGURA 18. Resultados de forma gráfica de nuestro análisis estadístico u de mann whitney.	47

RESUMEN

Los corales marinos viven en simbiosis con algas, la alteración de las condiciones en su hábitat representa la interrupción de dicha relación y, por ende, la supervivencia de ambos organismos puede verse altamente amenazada. Su conservación es de suma importancia, ya que provee hábitats para distintas especies de peces con interés comercial alrededor del mundo, y al mismo tiempo posee características como la tridimensionalidad, la mucosa que se convierte en alimento para organismos cercanos y también protegen de la fuerza del mar resguardando así las costas. Otros beneficios que pueden aportar son su gran atractivo turístico y sus componentes biomédicos que pueden ser utilizados para combatir distintas enfermedades. Como también eliminan y reciclan CO_2 , el cual es uno de los principales agentes del efecto invernadero. La pérdida de este hábitat representa pérdidas en distintos sectores, las cuales pueden ser irreversibles, por ello que se han implementado nuevas técnicas como la Tecnología de acreción de minerales y el cemento marino para ayudar a la resiliencia de los corales ante el cambio climático y acelerar su crecimiento para que las colonias existentes puedan ser restauradas con ejemplares que sean aptos para fortalecerlos y que puedan prolongar su existencia. Se colocaron tres tipos de estructuras para tener una mayor variabilidad y con ello determinar la metodología y estructura más adecuada para el desarrollo de los fragmentos de coral durante el proceso de restauración. Las estructuras colocadas se basan en tres tipos de materiales, los cuales son varillas de refuerzo (Mini Dome), dodecaedro de metal (Endless Reef) y esferas de concreto marino (Reef Ball). Las dos primeras utilizan la tecnología MAT, este método aplica corrientes eléctricas seguras y de bajo voltaje a través del agua de mar, lo que da como resultado que los minerales disueltos cristalicen en las estructuras, convirtiéndose en una piedra caliza blanca similar a la que compone naturalmente a los arrecifes de coral esto puede suponer un crecimiento acelerado y con mayor probabilidad de supervivencia. Por otra parte, los Reef Ball, al contener un pH de 8 el cual es semejante al del agua de mar supone un crecimiento continuo.

ABSTRACT

Marine corals live in symbiosis with algae, the alteration of the conditions in their habitat represents the interruption of this relationship and, therefore, the survival of both organisms can be highly threatened. Its conservation is of the utmost importance, since it provides habitats for different species of fish with commercial interest around the world, and at the same time it has characteristics such as three-dimensionality, the mucosa that becomes food for nearby organisms and also protects us from force from the sea, thus protecting the coasts. Other benefits that they can bring us are its great tourist attraction and its biomedical components that can be used to combat different diseases. As they also eliminate and recycle CO₂, which is one of the main agents of the greenhouse effect. The loss of this habitat represents sectors lost in different areas, which may be irreversible, which is why new techniques such as Mineral Accretion Technology (MAT) and marine cement have been implemented to help the resilience of corals in the face of climate change and accelerate their growth so that existing colonies can be restored with specimens that are suitable to strengthen them and that can prolong their existence. Three types of structures have been placed to have a greater variability and thus determine the most appropriate methodology and structure for the development of coral fragments during the restoration process. The structures placed are based on three types of materials, which are reinforcing sphere rods (Mini Dome), metal dodecahedron (Endless Reef) and marine concrete (Reef Ball). The first two use MAT technology, this method applies safe, low-voltage electrical currents through seawater, resulting in dissolved minerals crystallizing in the structures, turning into a white limestone similar to the one that naturally composes coral reefs, this can mean accelerated growth and a greater probability of survival. On the other hand, the Reef Ball, as it contains a pH of 8 which is similar to that of seawater, implies continuous growth.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral tropicales son el ecosistema marino con mayor biodiversidad del mundo (Fisher, et al., 2015); ellos aportan a millones de personas en el mundo, seguridad alimentaria, prácticas culturales y medios de subsistencia, proporcionando servicios ecosistémicos que generan miles de millones de dólares para la economía mundial a través de beneficios como la pesca, el turismo y la protección de las costas (Moberg y Folke 1999, Cesar y otros 2003, De Groot y otros 2012). Sin embargo, el rápido crecimiento de las poblaciones humanas y el desarrollo costero, el cambio climático y la extracción insostenible de los recursos de los arrecifes ha llevado a un aumento de las presiones sobre los corales vivos, los arquitectos submarinos tridimensionales de los sistemas de arrecifes tropicales (Gardner, et al., 2005, Bruno y Selig 2007, Carpenter y otros. 2008, De'ath y otros. 2012).

En las últimas décadas se ha visto un incremento tanto en la frecuencia como en la intensidad de eventos de blanqueamiento de coral, considerándose una de las principales amenazas a los ecosistemas coralinos (Van Oppen y Lough, 2009). Algunos efectos causados por esta manifestación son la disminución en las tasas de crecimiento coralino y calcificación, y la muerte del tejido del animal (Baker, Glynn y Riegl, 2008), factores que afectan a largo plazo a la comunidad, ya que causan pérdidas en la capacidad de las colonias para reproducirse y para competir contra otras especies. Como resultado, el arrecife se degrada, por lo que se vuelve menos productivo y disminuye, así, la calidad de sus servicios ambientales (Veron, et al., 2009).

Los dinoflagelados son protistas microscópicos unicelulares que forman el phylum Pyrrophyta, constituido por dos clases: Dinophyceae, con más de

4 000 especies de vida libre, y Syndinophyceae, con alrededor de 40 especies parásitas y simbioses. Su adaptación a una gran variedad de ambientes se ve reflejada en su diversidad de formas, tipos de nutrición y un enorme registro fósil que data de varios millones de años. (González, et al., 2011). A este grupo de dinoflagelados pertenecen las algas simbióticas del género Symbiodinium (zooxantelas), que invaden una gran variedad de invertebrados marinos calcificados y no calcificados y han desarrollado capacidades para evitar los sistemas inmunitarios del huésped y desarrollar asociaciones mutualistas.

Los corales escleractínios o pétreos son un buen ejemplo de simbiosis con zooxantelas (Stanley, et al., 2008). Son organismos fotosintéticos que carecen de clorofila b, pero poseen clorofila a, c2 y varios carotenoides. Son generalmente de color marrón o amarillo, esto gracias a la presencia de peridinas y transdioxantinas, lo cual se ve reflejado en el color de los corales (Douglas, 2003). Durante el día, los corales, proporcionan a su huésped los productos orgánicos de carbono de la fotosíntesis, a veces proporcionando hasta el 90% de las necesidades de energía de su huésped para el metabolismo, el crecimiento y la reproducción. A cambio reciben por parte del alga nutrientes, dióxido de carbono y una posición elevada con acceso a luz solar (Ruppert, et al., 2004). La capacidad de calcificación rápida y las ventajas metabólicas conferidas por la fotosimbiosis permiten a los escleractinios zooxantelados dominar, crecer rápidamente y construir arrecifes en las aguas oligotróficas de los trópicos (Stanley, et al., 2008).

Las variaciones en la salinidad, la intensidad de la luz, la temperatura, la contaminación, la sedimentación y las enfermedades pueden afectar la eficiencia fotosintética de las zooxantelas o provocar la expulsión de sus

relaciones mutualistas (Ladriere y Ophélie, et al., 2008). Géneros como *Symbiodinium* Freudenthal son fundamentales para la formación y el funcionamiento de los arrecifes de coral. En general, presentes tanto como productores primarios, heterótrofos y parásitos, son esenciales en los ambientes acuáticos (Gomez, Moreira, Lopez y Garcia, 2011).

Una de las técnicas de restauración de coral que se han introducido es la acumulación de minerales mediante electrólisis en agua de mar (Hilbertz y Goreau, 1996), también llamado tecnología de acreción mineral (MAT), es un método que aplica corrientes eléctricas seguras y de bajo voltaje a través del agua de mar, lo que hace que los minerales disueltos cristalicen en las estructuras, convirtiéndose en una piedra caliza blanca similar a la que compone naturalmente los arrecifes de coral y las playas tropicales de arena blanca, conocido también como sustrato semi artificial por Cohen, 2018 en su artículo “Depósitos minerales obtenidos por electrólisis y sus posibles aplicaciones en restauración de arrecifes de coral”, donde se observó una precipitación mayor del calcio utilizando electrólisis. Este calcio se deposita en forma de carbonato cálcico, que es el compuesto principal del esqueleto calcáreo de los corales.

El cátodo usado puede ser cualquier material conductor, preferiblemente una rejilla de acero, mientras que el ánodo puede estar formado de carbono, plomo o titanio (Cohen, 2018). Esta técnica consiste en hacer pasar un voltaje bajo y una corriente continua a través de dos electrodos (cátodo y ánodo separados) para inducir la electrólisis del agua de mar, donde los iones se desplazan hacia los electrodos en virtud de su carga iónica. Las reacciones de reducción y oxidación tienen lugar simultáneamente cuando se aplica la electricidad (Hilbertz, 1992). En el cátodo, el agua se divide para

formar gas hidrógeno y dos moléculas de anión hidróxido. La precipitación de calcio y magnesio se produce con la combinación de los iones de calcio con bicarbonato disuelto (Ca^{2+} y HCO_3^-) para formar carbonato de calcio y magnesio (CaCO_3 y Mg^{2+}) con las dos moléculas de Hidróxido (OH^-) para formar hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). El entorno de pH alrededor del cátodo es básico. Simultáneamente, el proceso de oxidación en el ánodo crea un entorno ácido debido a la formación de Hidrógeno y Dioxígeno gaseoso (H_2 y O_2) a partir de agua (H_2O). Los iones de cloro disueltos también se oxidan presumiblemente para formar gas de cloro (Cl_2).

Los corales expuestos a la electrodeposición de iones minerales mostraron un aumento del porcentaje de crecimiento longitudinal y de la circunferencia (Sabater y Yap, 2002). Las propiedades de los coralitos, como el tamaño y el número por unidad de superficie, se vieron alteradas. Este proceso también mejoró la supervivencia de los trasplantes de coral (Van Treeck y Schuhmacher, 1997 & Sabater y Yap, 2002) a través de la fijación firme provocada por la acumulación de minerales en la zona de fijación.

La restauración activa o el proceso de ayudar activamente a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido; (SER 2004) puede ser necesaria cuando la recuperación natural del ecosistema es imposible (Perrow & Davy 2002). La restauración de los arrecifes de coral suele considerarse una acción de emergencia a pequeña escala para ganar tiempo (Shaver y Silliman 2017) mientras se aborda el cambio climático y la mala calidad del agua a escalas espaciales más amplias (Hughes, *et al.*, 2017; IPCC 2018).

Esta técnica proporciona una forma rentable de aumentar la supervivencia de los corales frente al blanqueamiento y las enfermedades, al tiempo que se restauran los arrecifes dañados. Con el tiempo, estas estructuras se adhieren al fondo del océano, proporcionando una barrera física que puede proteger las costas de las olas y las corrientes que causan la erosión (GCRA, 2002). El MAT nos permite cultivar corales más rápido de lo normal y más resistentes al estrés ambiental, como los sedimentos, la contaminación y las altas temperaturas (GCRA, 2009). Este material tiene una resistencia similar a la del hormigón. Puede utilizarse para crear robustos arrecifes artificiales en los que los corales crecen a gran velocidad.

El estudio utiliza Endless Reef, una estructura de arrecife artificial modular compuesta por dos unidades metálicas planas combinadas en una sola unidad. Esta característica permite un montaje rápido y sencillo, así como un transporte y escalabilidad convenientes. Además, Endless Reef es capaz de soportar la tecnología de acreción mineral. Su forma de dodecaedro posibilita configuraciones modulares entrelazadas que pueden instalarse individualmente, en grupos entrelazados o como parte de una estructura marina existente. Estas diversas configuraciones ofrecen una amplia variedad y escalabilidad (Boskalis, 2020).

Otra de las estructuras utilizadas son los módulos Reef Ball, estos están diseñados para imitar los arrecifes naturales. Fabricado con aditivos especiales para el concreto, con un pH similar al del agua de mar, lo que asegura la compatibilidad con los entornos marinos y aumenta su atractivo para los organismos colonizadores (Reef Ball foundation, 2020).

El cambio en el entorno producido por las corrientes eléctricas acelera la formación y el crecimiento tanto de la roca caliza química como de los esqueletos de los corales y otros organismos con concha. La electricidad impulsa la electrólisis del agua que provoca las reacciones químicas que hacen crecer los minerales disueltos en el agua de mar. También evita toda la oxidación del metal. Y proporciona energía a los organismos expuestos al campo eléctrico, provocando un crecimiento más rápido y una mayor resistencia al estrés ambiental. Sin la corriente eléctrica, estas ventajas desaparecen (Global Coral Reef Alliance, 2011).

Este estudio proporcionará una comprensión más profunda del funcionamiento de las nuevas técnicas de restauración de corales y de las ventajas que estas ofrecen. Al analizar detalladamente la implementación y efectividad de estos métodos innovadores, se podrá evaluar cómo contribuyen a la recuperación y sostenibilidad de los ecosistemas coralinos. La investigación no solo permitirá identificar los beneficios específicos en términos de mejora del crecimiento y la salud de los corales, sino que también facilitará la optimización de las estrategias de restauración.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la efectividad de tres estructuras artificiales: Reef Ball, Endless Reef y Mini Dome, con las técnicas de acreción de minerales (MAT) y de cemento marino en la restauración de corales pétreos de la especie *Acropora cervicornis*.

Objetivos Específicos

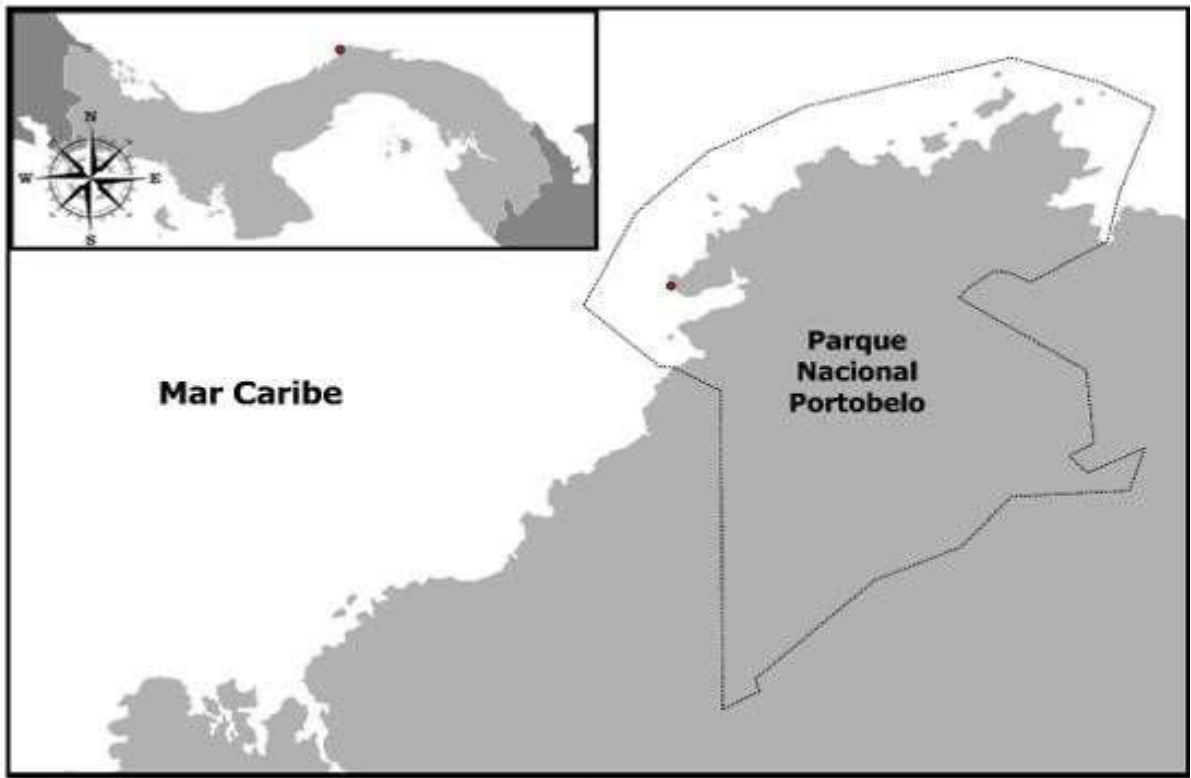
- Determinar la efectividad de la tecnología de acreción de minerales (MAT) y cemento marino en tres estructuras de guardería para el desarrollo de fragmentos de la especie *A. cervicornis*.
- Estimar los datos oceanográficos físicos - químicos y su influencia en la tasa de crecimiento de fragmentos de la especie *A. cervicornis* como respuesta a la tecnología MAT.
- Identificar las especies marinas asociadas a la presencia de los fragmentos *A. cervicornis* en las estructuras con tecnología MAT.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Área geográfica de estudio

El área de estudio está situada en Bahía Huertas, Parque Nacional Portobelo, Costa arriba de Colón, Panamá con coordenadas 9.5489° N, 79.6530° W (Figura 1). El sitio se encuentra ubicado cerca del centro de buceo de Scuba Portobelo y la conexión con una fuente de energía, debido a la necesidad de servicio eléctrico para la aplicación de la técnica de MAT.

Figura 1. Vista aérea del área de estudio y ubicación en la costa de Colón, zona de Bahía Huertas. Mapa por Luis Bernal.



El área de estudio tiene un fondo marino arenoso/rocoso, lo que garantiza la estabilidad de las estructuras de los arrecifes artificiales (Figura 2). El perfil de profundidad varía entre 3 y 10 metros. Esta es adecuada para la instalación de las unidades de arrecifes artificiales garantizando la inmersión

completa de las diferentes unidades y manteniendo la operatividad, ya que la instalación no se encuentra a demasiada profundidad.

Figura 2. Vista de fondo marino arenoso/rocoso en la zona de Bahía Huertas, Parque nacional Portobelo, Colón.



2.2 Tipos de estructuras, funcionalidad e instalación.

Se instalaron seis estructuras, dos de cada modelo trabajado (Reef Ball, Endless Reef y Mini Dome), en un área en forma circular para facilitar la toma de datos de los fragmentos y datos oceanográficos, en el área de estudio, de las cuales tres se tomaron en cuenta para esta investigación, simplificando así el proceso de recopilación de datos y facilitando su gestión (Figura 3).

Figura 3. Ubicación de las seis estructuras estudiadas con fragmentos de corales dentro de la Bahía Huertas.



El ánodo se instaló en el centro del circuito para que así pudiera proveer corriente eléctrica de forma efectiva a las estructuras tipo Mini Dome y Endless Reef.

Estructura tipo Mini Dome: hechas de rebar o barras de refuerzo en forma de pentágono, son muy livianas lo que simplifica su instalación y manejo. Las mismas generaron muy poco arrastre de sedimentos durante su proceso de trabajo. Aquí los fragmentos fueron adheridos por medio de cables eléctricos lo que permitió la conductividad de la electricidad (Figura 4).

Figura 4. Estructura tipo Mini Dome con fragmentos de coral adheridos.



Estructura tipo Endless Reef: Estas estructuras están hechas a partir de hierro con forma de dodecaedro lo que forma una especie de mini cúpula, y es un proceso más complejo para que encajen entre sí. Proporcionan una tridimensionalidad y refugio para la vida marina. Posee una superficie más ancha, lo que demandó más tiempo de limpieza. También se utilizaron cables eléctricos para adherir los fragmentos (Figura 5).

Figura 5. Estructura tipo Endless Reef con fragmentos de coral adheridos.



Estructura tipo Reef Ball: Están hechas de cemento marino, lo cual ofrece un pH bastante similar al agua marina. Su costo fue un poco más alto respecto a las demás estructuras, fueron necesarios equipos especiales para poder llevarlas a la zona de trabajo (bote, grúa, etc). Este es el único método que no posee electricidad. Los fragmentos fueron adheridos en esta estructura con una base de cemento (ver figura 7). los cuales se introdujeron en los orificios de ésta para luego ser sellados con masilla epoxi de dos componentes resistente al agua (Figura 6).

Figura 6. Estructura tipo Reef Ball con corales adheridos.



2.3 Fragmentación inicial y trasplante en las estructuras

Los fragmentos de coral utilizados en las estructuras fueron obtenidos de colonias naturales adyacentes al área de estudio, específicamente de un arrecife de coral en el área de Bahía Huertas. Los tamaños en longitud de los fragmentos variaron entre 9 a 10 centímetros de longitud. Los mismos fueron trasladados en canastas bajo el agua hasta el lugar donde se colocaron las bases de cemento, para luego ser plantadas en la estructura

con masilla epoxi de dos componentes, para la estructura Reef Ball específicamente (Figura 7).

Figura 7. Bases de cemento en fragmentos.



2.4 Toma de datos de crecimiento en *Acropora cervicornis*

El estudio tuvo una duración de 12 meses, iniciando en marzo de 2021 y culminando en marzo de 2022, que es el periodo en que los fragmentos pueden alcanzar tamaños para su cosecha (Mercado M. A. et al., 2013). Durante este tiempo se realizaron un total de 11 monitoreos de campo, en los que se tomaron datos de los parámetros físicos - químicos oceanográficos de la zona, por medio del uso de una sonda multiparamétrica (sólidos disueltos totales, temperatura, conductividad, salinidad, oxígeno disuelto, demanda de oxígeno, pH, velocidad y dirección de corrientes marinas), las medidas del crecimiento de los fragmentos y de las ramificaciones y el mantenimiento de las estructuras. Se tomaron en cuenta 6 meses para el análisis de datos, ya que existieron limitaciones en cuanto a

la toma de datos, específicamente por problemas de flotabilidad en los buzos y la claridad de dichos datos al momento de hacer la entrada de data. Los datos recopilados durante los meses afectados por estos problemas podrían ser menos confiables o estar incompletos, lo que limita su utilidad para el análisis.

Con el objetivo de optimizar el tiempo empleado en el estudio de las estructuras de corales, se implementó un enfoque de muestreo aleatorio, donde se seleccionaron al azar diez fragmentos de coral por cada estructura. Esta estrategia permitió abarcar una representación adecuada de diversidad de los corales en un período de tiempo más eficiente. La selección aleatoria de fragmentos garantizó la imparcialidad en la elección de muestras, minimizando el sesgo y proporcionando una base sólida para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos y así obtener el promedio de crecimiento total y cantidad de ramificaciones nuevas. Todas las actividades de colecta, plantación y mantenimiento se realizaron con la colaboración de cinco personas, cada una utilizando un equipo de buceo autónomo. La construcción de las estructuras se realizó fuera del agua y el traslado de estas se llevó a cabo mediante el uso de una embarcación de 25-27 pies con motores fuera de borda con caballaje de 45 – 80.

Se realizaron jornadas de limpieza a las estructuras de forma periódica ya que funciona como estrategia para maximizar las probabilidades de supervivencia en los fragmentos (Edwards et al., 2007). Utilizando cepillos de hebras gruesas para limpiar las estructuras y cepillos de diente para limpiar los fragmentos y aquellas áreas muy cercanas a los mismos. Esta acción ayuda a eliminar sedimento acumulado, algas en crecimiento e

invertebrados pequeños, los cuales pueden deteriorar la calidad del agua circundante o afectar el tejido vivo del fragmento de coral (Shafir et al., 2006).

2.5 Toma de parámetros oceanográficos

La toma de datos oceanográficos se realizó desde la segunda salida y en cada uno de los monitoreos. Los datos de crecimiento en longitud total y cantidad de ramificaciones, se tomaron cada 30 días. Los mismos incluyen profundidad, temperatura, salinidad, porcentaje de oxígeno disuelto, pH, total de sólidos disueltos, velocidad de la corriente, conductividad y velocidad del aire.

2.6 Registro del muestreo

Cada fragmento fue diferenciado con una etiqueta de plástico, con el código y color de individuo y de igual manera cada estructura estaba marcada con un color específico de manera que facilitó la colecta de los datos y el análisis de estos como lo recomienda Mercado M. A. et al., (2013) (Ver figura 8).

Figura 8. Fragmento R-3 de la Estructura Reef Ball, con su etiqueta y color correspondiente.



2.7 Observación de especies asociadas

Las observaciones fueron realizadas por todos los estudiantes voluntarios involucrados y la información fue discutida luego de cada monitoreo. Posterior a esto se procedió a la identificación de todas las especies utilizando el registro mundial de especies marinas (WORMS).

CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.0 Análisis del crecimiento de los fragmentos

Se sembró un total de treinta fragmentos de coral, lo que representa un estimado de tres metros de coral en Bahía Huertas. Posterior a los doce meses de estudio se estimó un total de 18.42 centímetros de coral totalmente nuevo, lo que nos da a entender que probablemente la zona escogida para las guarderías de corales y para el uso de la tecnología MAT presenta condiciones óptimas para este tipo de actividad llevada hacia una posterior restauración de arrecifes de coral.

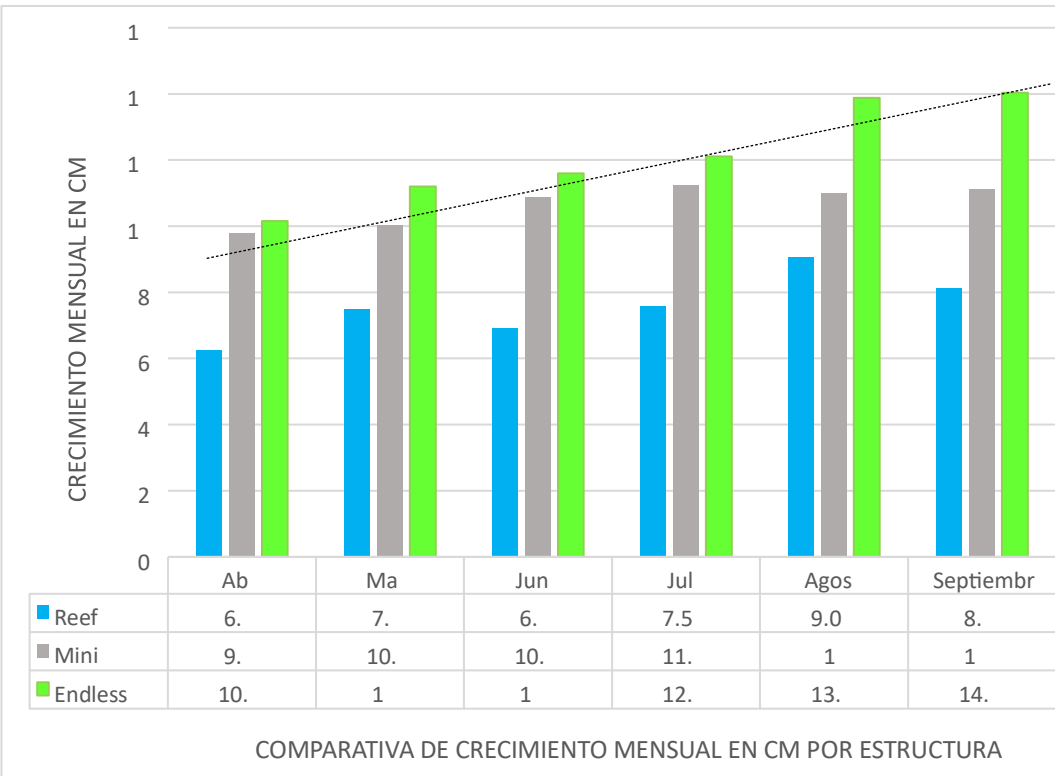
3.1 Análisis de longitud total de los fragmentos de *Acropora cervicornis* por tipo de estructura

Durante los dos primeros meses de estudio (abril y marzo) los fragmentos de coral colocados en la estructura tipo Reef Ball, presentaron un crecimiento total de 1.24 cm. Se observó que algunos fragmentos sufrieron daños por actividad desconocida en el mes de junio, pero para julio se observa un aumento en el crecimiento de estos. A partir del quinto mes (agosto) se pudo determinar un aumento en el desarrollo y crecimiento de los fragmentos. El máximo crecimiento por mes obtenido en esta estructura fue de 1.5 cm. Dando como resultado un crecimiento total de 1.87 cm. Según el estudio realizado en el caribe colombiano por García-Urueña et al., (2020) sus fragmentos crecieron 1.5 cm por mes, lo cual es consistente con el resultado obtenido por esta investigación.

Para la estructura tipo Mini Dome, entre abril y mayo los fragmentos presentaron un incremento promedio de 0.24 cm de longitud, en los dos meses siguientes (junio y julio) el crecimiento aumentó a 0.38 cm. En el mes de agosto se presentaron fragmentos dañados, y uno blanqueado por

razones desconocidas, obteniendo así menos crecimiento. El máximo crecimiento mensual registrado para esta estructura fue de 0.84 cm. Se observa que el crecimiento de longitud total de los fragmentos en los Mini Domes fue de 1.32 cm. En la tasa de crecimiento lineal obtenida en el Programa de acción para la conservación de las especies en riesgo *Acropora* realizado en México, el intervalo de crecimiento es de 3 a 11.5 cm por año para diferentes localidades del Caribe (SEMARNAT, 2018) lo que representa un mínimo de 0.25 cm por mes, esto quiere decir que los resultados obtenidos para esta estructura, mensualmente, están dentro de dicho intervalo.

Figura 9. Longitud total promedio de los fragmentos en los distintos tipos de estructura. Representados de forma lineal de acuerdo con su crecimiento, durante los meses de abril hasta septiembre del año 2021.



En los primeros dos meses (abril y mayo) hubo un incremento de 1.04 cm en la longitud total, en la estructura Endless Reef. En junio y julio se observa un aumento de 0.51 cm, y para agosto y septiembre el incremento fue de unos 0.16 cm. El mayor crecimiento mensual fue de 1.77 cm. Esto representa un crecimiento exponencial de longitud total de 3.88 cm (Ver figura 11). Los datos de los fragmentos de la estructura. Endless Reef concuerdan con el estudio realizado por Weil et al. (2020) en Puerto Rico donde los fragmentos de *A. cervicornis* crecieron de 0.44 cm a 3.1 cm por mes.

Al comparar los valores promedios de crecimiento final para las estructuras estudiadas, se puede decir que los fragmentos de *A. cervicornis*, alcanzan un mayor crecimiento al estar colocados en la estructura tipo Endless Reef, donde se alcanzó un promedio final de 3.88 cm.

Se utilizó la prueba estadística U de Mann-Whitney a dos caras, con una significancia de 0.05 para comprobar la hipótesis alternativa, sobre si hay una diferencia significativa respecto a la longitud total de los fragmentos entre las estructuras Mini Dome y Endless Reef, las únicas que contaron con electricidad.

Los datos se separaron de la siguiente forma, grupo 1: longitud total Mini Dome y grupo 2: longitud total Endless Reef.

Fórmulas utilizadas:

- $U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1, U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2$

$$U = U_1, U_2$$

- $U_{Crítica} = n_1, n_2$ en los valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$). Ver figura 9.

Donde, U_1 es igual al número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo dos ($n_1 n_2$), más el número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo uno, más uno entre dos ($\frac{n_1(n_1+1)}{2}$, *Middle Term 1*) menos la sumatoria de los rangos del grupo uno (R_1).

En la segunda fórmula, U_2 es igual al número de variables del grupo 1 por el número de variables del grupo 2 ($n_1 n_2$) más el número de variables del grupo 2 por el número de variables del grupo 2 más 1 entre 2 ($\frac{n_2(n_2+1)}{2}$, *Middle Term 2*) menos la sumatoria de los rangos del grupo 2 (R_2).

Para encontrar la U de Mann-Whitney, se elige el término menor entre U_1 y U_2 . La U en este caso es igual que la $U_{Crítica}$ es decir, la hipótesis es nula y no hay diferencias estadísticamente significativas para crecimiento en longitud total.

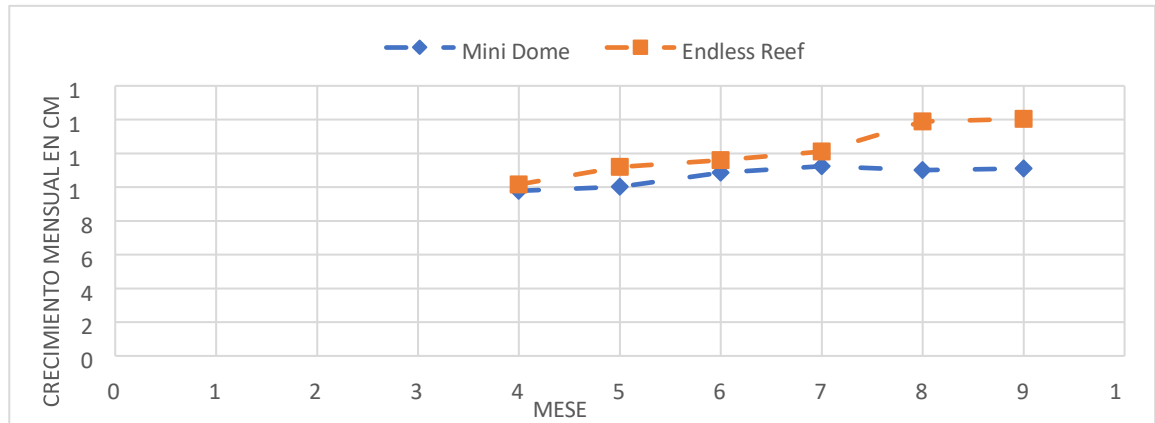
Figura 10. Valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para longitud total entre Endless Reef y Mini Dome.

		n																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
m	1																									
	2							0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
	3				0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10
	4			0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14	15	16	17	17	18	18
	5				2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	20	22	23	24	25	27	27
	6					5	6	8	10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	35
	7						8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	29	31	34	36	38	41	43	45	48	50
	8							13	15	17	19	22	24	26	29	31	34	37	39	42	45	48	50	53	56	59
	9								17	20	23	26	28	31	34	37	39	42	45	48	52	55	58	61	64	67
	10									23	26	29	33	36	39	42	45	48	52	55	58	61	64	67	71	71
	11										30	33	37	40	44	47	51	55	58	62	65	69	73	76	80	80
	12											37	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81	85	89	89
	13												45	50	54	59	63	67	72	76	80	85	89	94	98	98
	14													55	59	64	69	74	78	83	88	93	98	102	107	107
	15														64	70	75	80	85	90	96	101	106	111	117	117
	16															75	81	86	92	98	103	109	115	120	126	126
	17																87	93	99	105	111	117	123	129	135	135
	18																	99	106	112	119	125	132	138	145	145
	19																		113	119	126	133	140	147	154	154
	20																			127	134	141	149	156	163	163
	21																				142	150	157	165	173	173
	22																					158	166	174	182	182
	23																						175	183	192	192
	24																								192	201
	25																									211

Cuadro 1. Datos utilizados en la prueba estadística U de Mann Whitney para comparar longitud total promedio para estructuras con MAT.

Datos	Mini Dome	Endless Reef
Middle term1	21	
Middle term2		21
R1	26	
R2		52
U1	31	
U2		5
U		5
U Crítica		5

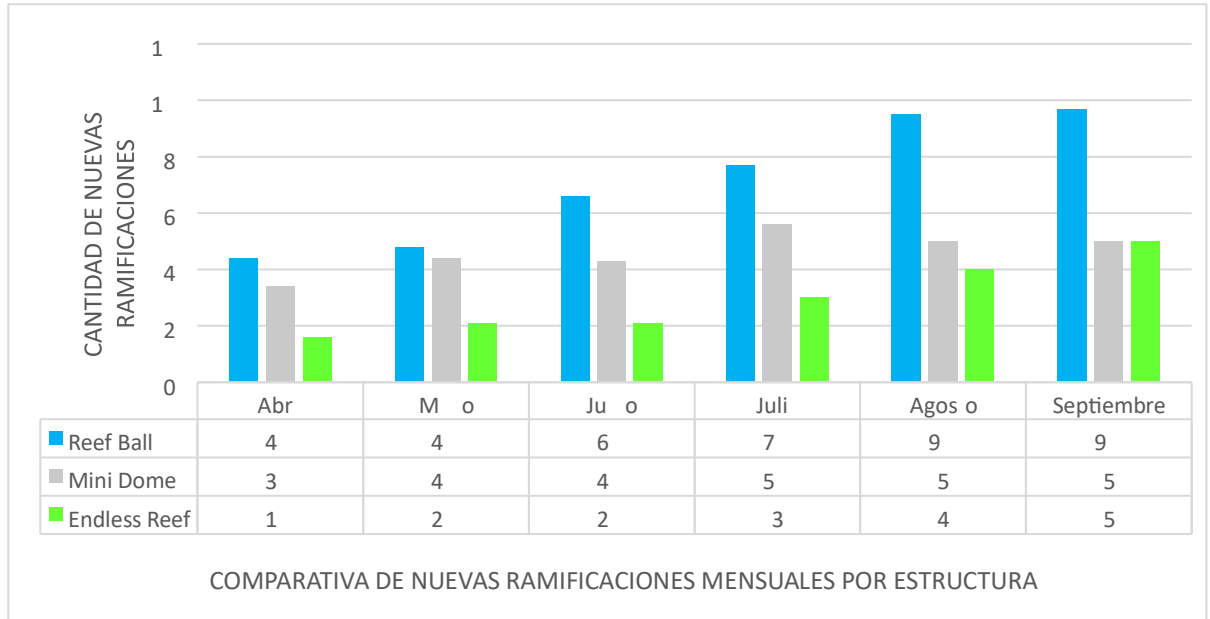
Figura 11. Gráfica de dispersión del análisis estadístico U de Mann Whitney para longitud total promedio de los fragmentos de *Acropora cervicornis* en estructuras con MAT.



3.2 Análisis de número promedio de nuevas ramificaciones de los fragmentos de *Acropora cervicornis* por tipo de estructura.

En los dos primeros meses, para la estructura Reef Ball, se puede observar un aumento en la cantidad de ramificaciones de 0.4. Para junio y julio el incremento en el número de ramificaciones es de 1.1. Entre agosto y septiembre fue de 0.2. Como resultado se obtiene en promedio 5.3 nuevas ramas.

Figura 12. Gráfica de números promedio de nuevas ramificaciones de *Acropora cervicornis* observadas durante los seis meses de estudio.



La estructura Reef Ball produjo 5,3 nuevas ramificaciones, tomando en cuenta que para el mes de abril contó con un promedio de 4.4 y concluyó septiembre con 9.7, destacando que es la única estructura que no recibió electricidad.

En la estructura Mini Dome, para abril y mayo, el aumento en la cantidad de fragmentos de coral fue de 1, en los dos meses siguientes (junio y julio) se observa un crecimiento de 1.3. Entre agosto y septiembre no se identifica nuevas ramificaciones. En esta estructura se obtuvo como promedio 1.6 nuevas ramas. Entre el primer y segundo mes, en la estructura Endless Reef, hay un incremento de 0.5. Para junio y julio se observa un aumento de 0.9. Para los últimos dos meses (septiembre y octubre) el incremento es de 1. El resultado final de esta estructura es en promedio de 3.4 nuevas ramas (Figura 14).

La gráfica de este estudio, para desviación estándar (figura 15), muestra que los resultados obtenidos, en promedio, han sido de 1.12 ± 0.75 para la estructura Reef Ball, 0.32 ± 0.79 en el caso de la Mini Dome y 0.68 ± 0.43 nuevas ramificaciones para Endless Reef mensualmente. Para poder comparar estos resultados con los de Mercado-Molina et al., (2015), donde nos señala que la especie *A. cervicornis* es capaz de crecer desde 7.02 ± 5.72 a 11.86 ± 7.06 nuevas ramificaciones por fragmento por año, se multiplicó el rango promedio por 12, al igual que para la desviación estándar. Es decir que los rangos anuales obtenidos fueron los siguientes: Reef Ball 13.44 ± 9.0 , Mini Dome 3.84 ± 9.48 y Endless Reef 8.16 ± 5.16 .

Podemos decir que comparando la estructura Reef Ball de nuestro estudio con otros estudios como el de Mercado-Molina et al, nuestros resultados muestran un crecimiento promedio anual mayor que el rango reportado por el autor, pero con una mayor desviación estándar, lo que indica una mayor variabilidad. La Mini Dome tiene un crecimiento significativamente menor y una desviación estándar mayor. La Endless Reef presenta un crecimiento dentro del rango esperado y una desviación estándar similar a la reportada en el estudio, lo que sugiere resultados más consistentes y comparables con el estudio de Mercado-Molina.

La prueba estadística U de Mann-Whitney, con una significancia de 0.05 fue implementada para comprobar la hipótesis alternativa, sobre si hay una diferencia significativa respecto al número de nuevas ramificaciones entre las estructuras que utilizaron Mineral Accretion Technology, las Mini Dome y Endless Reef.

Los datos se separaron de la siguiente forma, grupo 1: nuevas ramificaciones Mini Dome y grupo 2: nuevas ramificaciones Endless Reef.

Fórmulas utilizadas:

- $U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1, U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2$

$$U = U_1, U_2$$

- $U_{critica} = n_1, n_2$ en los valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$). Ver figura 13.

Donde, U_1 es igual al número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo dos ($n_1 n_2$), más el número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo uno, más uno entre dos ($\frac{n_1(n_1+1)}{2}$, *Middle Term 1*) menos la sumatoria de los rangos del grupo uno (R_1).

En la segunda fórmula, U_2 es igual al número de variables del grupo 1 por el número de variables del grupo 2 ($n_1 n_2$) más el número de variables del grupo 2 por el número de variables del grupo 2 más 1 entre 2 ($\frac{n_2(n_2+1)}{2}$, *Middle Term 2*) menos la sumatoria de los rangos del grupo 2 (R_2).

Se encontró la U de Mann-Whitney, eligiendo el termino menor entre U_1 y U_2 . Para la $u_{critica}$, se utiliza el cuadro de valores críticos, en donde se compara el número de variables de ambos grupos, en un contraste bilateral, dando como resultado el numero 5 (Figura 12). La U es mayor que la $U_{critica}$, en este caso, por lo tanto, la hipótesis es nula y no hay diferencias estadísticamente significativas para crecimiento en longitud total.

Según el valor de U y la U crítica obtenida en el presente estudio, permite concluir que no existe diferencia significativa entre las dos estructuras. Es decir que, estadísticamente no hubo diferencias entre las estructuras Endless Reef y Mini Dome en cuanto a nuevas ramificaciones.

Figura 13. Valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para número promedio de nuevas ramificaciones entre Endless Reef y Mini Dome.

		n																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
m	1																										
	2								0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	
	3									0	1	2	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10
	4				0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14	15	16	17	17	18	
	5					2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	20	22	23	24	25	27	
	6						5	6	8	10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	
	7							8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	
	8								13	15	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41	43	45	48	50	53	
	9									17	20	23	26	28	31	34	37	39	42	45	48	50	53	56	59	62	
	10										23	26	29	33	36	39	42	45	48	52	55	58	61	64	67	71	
	11											30	33	37	40	44	47	51	55	58	62	65	69	73	76	80	
	12												37	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81	85	89	
	13													45	50	54	59	63	67	72	76	80	85	89	94	98	
	14														55	59	64	69	74	78	83	88	93	98	102	107	
	15															64	70	75	80	85	90	96	101	106	111	117	
	16																75	81	86	92	98	103	109	115	120	126	
	17																	87	93	99	105	111	117	123	129	135	
	18																		99	106	112	119	125	132	138	145	
	19																			113	119	126	133	140	147	154	
	20																				127	134	141	149	156	163	
	21																					142	150	157	165	173	
	22																						158	166	174	182	
	23																							175	183	192	
	24																								192	201	
	25																									211	

Cuadro 2. Datos utilizados en la prueba estadística U de Mann Whitney para comparar el número promedio de nuevas ramificaciones para estructuras con MAT.

Datos	Mini Dome	Endless Reef
Middle term1	21	
Middle term2		21
R1	51	
R2		27
U1	6	
U2		30
U		6
U Critica		5

Figura 14. Gráfica de valores promedio de crecimiento de nuevas ramificaciones de *Acropora cervicornis* mediante el uso de estructuras Mini Dome y Endless Reef con MAT.

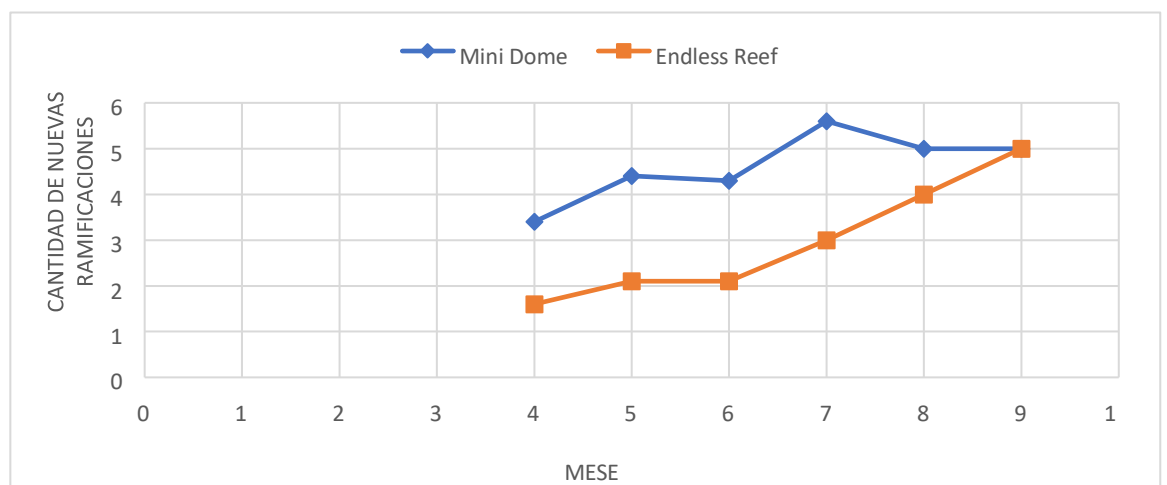
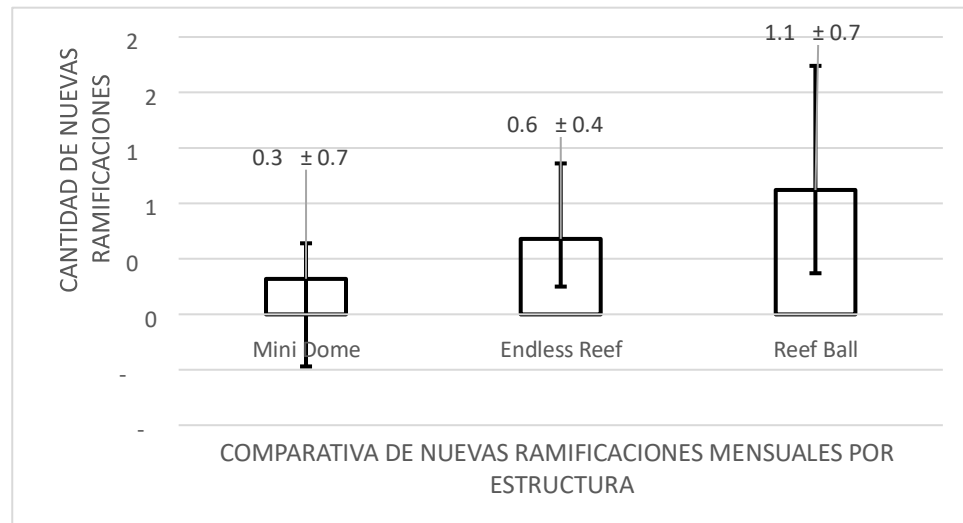


Figura 15. Gráfica de desviación estándar para nuevas ramificaciones de coral.



La desviación estándar fue calculada con la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\left(\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}\right)}$$

Donde s representa la desviación estándar, $\sum$ sumatoria, x cada valor, $\bar{x}$ la media aritmética y $n - 1$ el número de puntos de datos del conjunto de datos menos 1.

Los resultados obtenidos fueron cotejados con la función DESVEST, que calcula la desviación estándar en Excel, para mayor precisión.

3.3 Análisis de longitud de ramificaciones de los fragmentos de *Acropora cervicornis* por tipo de estructura

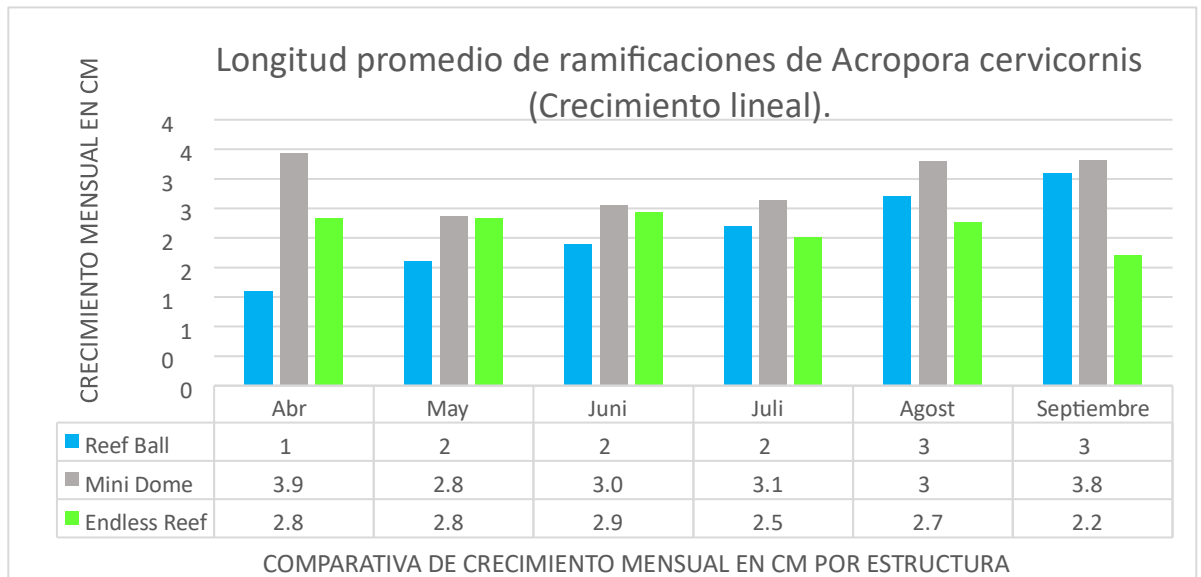
Los primeros dos meses (abril y mayo) se observó 0.5 cm de crecimiento en la estructura Reef Ball, luego se observó un aumento progresivo de 0.3 cm en el desarrollo de ramificaciones para los meses de junio y julio. En los dos

últimos meses el crecimiento fue de 0.4 cm. El máximo valor obtenido mensualmente fue de 1.77 cm. Esto da un total de 2 cm. Este resultado concuerda con el de Alex et al. (2016), donde las ramificaciones crecieron 1.08 cm por mes.

Para la estructura Mini Dome en el mes de abril, se obtuvo un número mayor de ramificaciones respecto a los demás meses, lo que puede deberse a que en el primer mes de monitoreo se presentaron complicaciones técnicas de buceo y no se pudieron tomar los datos de los fragmentos, por lo tanto, los datos del mes de abril no son tomados en cuenta para el promedio de longitud total de ramificaciones en esta estructura. Para los meses de abril y junio, ocurrió un incremento de 0.18 cm y para los meses de julio y agosto el crecimiento representa un valor de 0.66 cm. Para los siguientes meses de monitoreo, se observa poco o bajo incremento en el desarrollo de la longitud de las ramificaciones, obteniendo al final (septiembre) un crecimiento total de ramificaciones para esta estructura de 0.94 cm.

Estos resultados no concuerdan con los antes mencionados para de Alex et al., (2016), en Puerto Rico, ya que estas crecieron 1.08 cm por mes y en los datos del presente estudio el mayor número obtenido por mes fue de 0.18 cm.

Figura 16. Gráfica de longitud promedio de ramificaciones por estructuras. El cuadro de meses representa la sumatoria mensual de longitud de ramificaciones y la gráfica representa el crecimiento lineal.



En los dos primeros monitoreos de la estructura Endless Reef, el crecimiento de ramificaciones se mantiene sin cambios significativos. En junio podemos ver un incremento de 0.11 cm. Para julio, se observa un número bajo, ya que tres ejemplares perdieron sus etiquetas y no pudieron ser medidos. En agosto vemos un aumento de 0.18 cm con respecto al mes de junio. En septiembre la barra está baja, porque se encuentran ramificaciones nuevas, pero con menor longitud, es por esto que no podemos observar aumento en el crecimiento total de las ramificaciones, pero si en la cantidad (Ver figura 16).

En la estructura Reef Ball, se observa una mayor longitud en las ramificaciones alternas con un resultado de 2 cm luego de seis meses de estudio, sin embargo, ninguno de los resultados obtenidos concuerda con los estudios consultados, como lo es “Branching dynamics of transplanted

colonies of the threatened coral *Acropora cervicornis* realizado en Puerto Rico por Mercado-Molina et al., (2016), en donde las ramificaciones crecieron 8 cm después de seis meses de monitoreo.

Los datos se separaron de la siguiente forma, grupo 1: nuevas ramificaciones Mini Dome y grupo 2: nuevas ramificaciones Endless Reef.

Fórmulas utilizadas:

- $$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1, U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2$$

$$U = U_1, U_2$$

$U_{Critica} = n_1, n_2$ en los valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$). Ver figura +.

Donde, U_1 es igual al número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo dos ($n_1 n_2$), más el número de variables del grupo uno por el número de variables del grupo uno, más uno entre dos ($\frac{n_1(n_1+1)}{2}$, *Middle Term 1*) menos la sumatoria de los rangos del grupo uno (R_1).

En la segunda fórmula, U_2 es igual al número de variables del grupo 1 por el número de variables del grupo 2 ($n_1 n_2$) más el número de variables del grupo 2 por el número de variables del grupo 2 más 1 entre 2 ($\frac{n_2(n_2+1)}{2}$, *Middle Term 2*) menos la sumatoria de los rangos del grupo 2 (R_2).

Para encontrar la U de Mann-Whitney, se elige el termino menor entre U_1 y U_2 .

La U es menor que la $U_{Critica}$ para este caso, por lo tanto la hipótesis alternativa se acepta, demostrando así que las diferencias son significativas

entre ambas estructuras respecto a la longitud de las ramificaciones. Es decir que la estructura Endless Reef es más factible en cuanto a longitud de ramificaciones.

Figura 17. Valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$) para comprobar la significancia de crecimiento para longitud promedio de ramificaciones entre Endless Reef y Mini Dome.

Valores críticos para la prueba de Mann-Whitney a dos caras ($p < 0.05$)

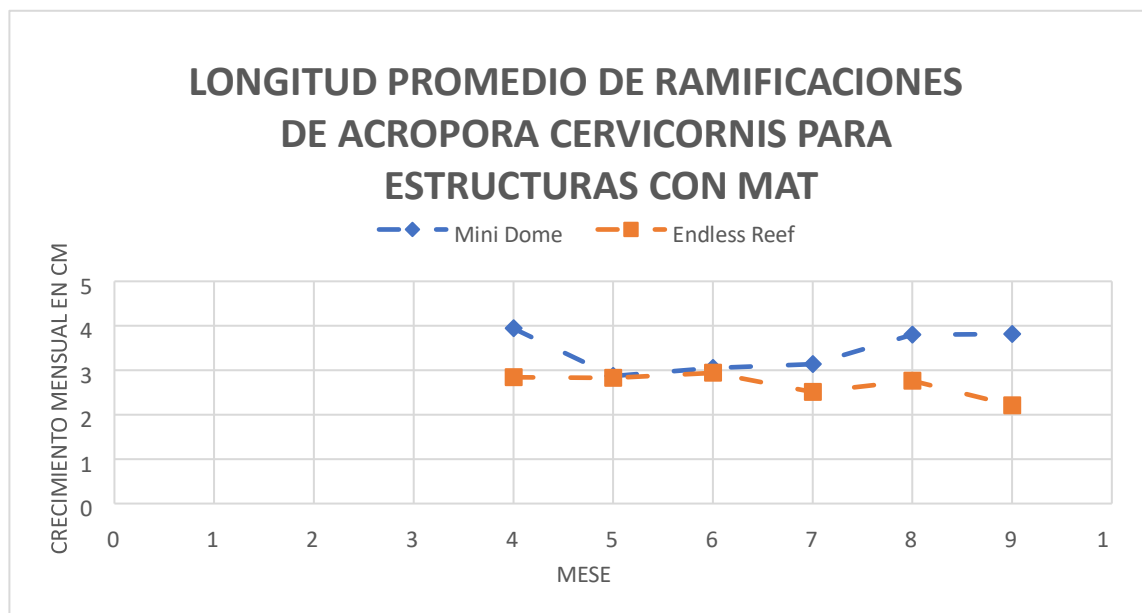
		n																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
m	1																									
	2																									
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										

Según nuestra U y la U crítica, concluimos que hay una diferencia significativa entre las dos estructuras. Se obtuvieron mejores resultados para la estructura Mini Dome, siendo esta la que mayor crecimiento en longitud de ramificaciones obtuvo.

Cuadro 3. Datos utilizados en la prueba estadística U de Mann Whitney para comparar longitud promedio de las ramificaciones en estructuras con MAT.

Datos	Mini Dome	Endless Reef
Middle term1	21	
Middle term2		21
R1	56	
R2		22
U1	1	
U2		35
U		1
U Critica		5

Figura 18. Resultados de forma gráfica de nuestro análisis estadístico U de Mann Whitney.



3.4 Análisis de la efectividad de la tecnología MAT (Mineral Accretion Technology)

Según Hilbetz et al., (1996) se esperaba que los corales crecieran aproximadamente 3.17 veces más rápido que los rangos normales, al igual que en el estudio: Restauración de coral a pequeña escala mediante acreción de minerales en la isla Malapascua, propuesto por Brugnoli et al., (2021), donde también los corales que crecen en estos “arrecifes artificiales electrificados” tienden a crecer 3-4 veces más rápido, pero este no es el caso en la presente investigación ya que los resultados se mantuvieron en rangos normales de crecimiento para longitud total (Mini Domes – 1.6 cm/mes, Endless Reef – 3.88 cm/mes.) y para ramificaciones nuevas (Mini Domes – 1.6 nuevas ramificaciones/mes, Endless Reef – 3.4 nuevas ramificaciones/mes).

Factores como la intensidad del voltaje utilizado pudieron influir en los resultados obtenidos, como fue propuesto por Margheritini et al., (2021) donde se compararon exoesqueletos de coral porites, utilizando deposición de minerales de alto voltaje (40 k V max.) y bajo voltaje (1.2 - 2.5 V).

Esta investigación mostró que el bajo voltaje tiene la mejor resistencia y la distribución más uniforme en el tamaño de los poros. Para el voltaje mayor, se observa una distribución de tamaño de poro más bimodal y una composición mineral diferente, lo que puede afectar las funciones y la fuerza del ecosistema. Por lo tanto, es probable que sea necesaria una combinación de procesos de crecimiento de alto voltaje y bajo voltaje, fijando límites específicos, para realmente lograr un crecimiento acelerado en la restauración de corales utilizando la técnica MAT, como también sugiere

Goreau (2015), en donde explica que existen dos errores que pueden afectar el crecimiento de los corales utilizando la acreción de minerales, y son que la corriente sea muy baja/nula o que, por el contrario, la corriente sea demasiado alta.

Esto significa que se debe designar personal necesario para poder hacer un monitoreo de las cantidades de voltaje que los corales están recibiendo, ya que durante el presente proyecto solo se pudo monitorear si las estructuras poseían electricidad, mas no la cantidad específica.

3.5 Análisis de parámetros oceanográficos

La temperatura media del agua en el Caribe ronda los 27°C y varía hasta 30°C

(Zárate et al. 2019).. Como promedio final se presentó un valor de 27.84°C (Cuadro 4), lo que indica que la temperatura se mantuvo estable para el desarrollo de los fragmentos durante toda la investigación Al igual que el estudio realizado por Franco et al., (2019) en Bocas del Toro, Panamá donde el promedio histórico y el actual no registraron temperaturas iguales o mayores a 31°C lo que permite afirmar que no incide en el blanqueamiento de los corales en el área de estudio.

La salinidad en el Mar Caribe suele estar ligeramente por debajo de las 36 ppm (Pernetta et al. 2004), sin embargo, el promedio final de la zona de estudio es de 47.7 ppm (Cuadro 4), lo que representa un número más alto del que se esperaba obtener y puede representar limitaciones en el crecimiento de los fragmentos, ya que 34 ppm se considera una salinidad

óptima según un estudio realizado en Estados Unidos, Texas, por Herrera et al., 2023.

El oxígeno disuelto desempeña un papel crucial en los ecosistemas acuáticos, siendo uno de los gases más significativos en su dinámica y caracterización (Roldán-Pérez, 2008). La gran mayoría de los animales marinos dependen de la presencia de oxígeno disuelto para sobrevivir. Bajos niveles de oxígeno disuelto, puede ser un indicativo de la existencia de una alta concentración de bacterias en el agua (Rogers et al., 2001). El oxígeno disuelto promedio en la superficie fue de 6.7 ± 1.3 mg/L, con un máximo de 9.6mg/L para un estudio realizado en Costa Rica (Alvarado., et al 2009) lo que concuerda con el promedio final obtenido en el sitio de estudio de 7.057 mg/L (Cuadro 4), lo que indica que el área estudiada posee una cantidad de oxígeno disuelto saludable.

En el Mar Caribe, los valores de pH promedio oscilan entre 8.0 y 8.19 (Arbizú, 2021), sin embargo, el promedio total obtenido en el estudio fue de 7.53 (Cuadro 4). Lo que se aproxima al estándar, con base en el texto de Cifuentes, Torres, & Frías (1997). En donde dice que en general, el agua de mar es ligeramente alcalina y el valor de su pH está entre 7,5 y 8,4.

La profundidad fue de 14.3 pies o 4 metros promedio, facilitando la entrada de la luz solar para el crecimiento de los fragmentos. Debido a la penetración de luz relativamente constante, los arrecifes poco profundos tienen el mayor porcentaje de cobertura de organismos fotosintéticos en comparación con otros arrecifes (Slattery y Lesser 2012).

La velocidad de la corriente (Cuadro 4) se mantuvo en 0.43 pies/segundos o 13.1 centímetros/segundo lo que coloca el resultado dentro de los valores medios normales de velocidad de corriente establecidas para la zona según el estudio realizado por Monroy et al., (2017) para Colombia en el mar Caribe en donde se obtuvieron rangos de 7.45 km/día (0.28 pies/segundos) hasta 21.1 km/día (0.80 pies/segundos).

Cuadro 4. Promedios obtenidos de los parámetros oceanográficos estudiados.

Parámetros Oceanográficos	Promedios obtenidos
Conductividad mS/cm	52.81
DO% (mg/L)	70.57
pH	7.53
Profundidad (ft)	14.3
Salinidad (g/l)	47.7
TDS (g/l)	38.35
Temperatura (°C)	27.84
Velocidad de la corriente (ft/s)	0.43
Velocidad del aire m/s	3.45

Los promedios finales obtenidos para los factores físico-químicos medidos, se dieron durante un mes de la estación seca (abril) y 5 meses más de la estación lluviosa para la ciudad de Panamá, (mayo - septiembre) sin embargo, esto no resultó ser una amenaza para el crecimiento de los corales según el texto de Strykowski., et al (1993), donde mencionan que los corales

crecen mejor en aguas subtropicales donde las temperaturas se mantienen entre 20 y 28 °C.

3.6 Identificación y estado de las especies asociadas a las estructuras

Se presentaron en todas las estructuras estudiadas, algas de césped, lo cual nos llevó a hacer limpiezas más constantes en las estructuras para evitar su colonización y que se presentara blanqueamiento de los fragmentos. Díaz-Pulido et al., (2009) en su estudio *Doom and boom on a resilient reef: climate change, algal overgrowth and coral recovery*, realizado en distintas áreas de la barrera de coral menciona que estas algas poseen altas tasas de colonización. El mismo fenómeno se reportó en el estudio de Brugnoli et al., (2021), donde uno de los objetivos de mantenimiento fue remover cualquier alga o esponja presente mediante cepillos de diente o cepillos de alambre, para evitar que las algas compitieran con los fragmentos de coral.

También se encontraron distintas especies de peces juveniles asociadas a las estructuras, lo que indica que este ecosistema está cumpliendo con funciones fundamentales, ya que, según Wilson et al., (2010) es reconocido como un hábitat importante para muchos peces juveniles.

La presencia de camarones limpiadores *Stenopus hispidus* representa una relación única en los arrecifes de coral, la cual es el comportamiento de limpieza entre camarones limpiadores y un gran número de especies de peces según Levinton, (1982). Por lo tanto, nuestro estudio presenta una relación ecosistémica muy parecida a lo mencionado por este autor. El comportamiento de limpieza, un tipo de simbiosis, se define como la eliminación y posterior ingestión de ectoparásitos y tejido enfermo y

lesionado por organismos de limpieza según lo mencionado por Losey, (1972).

Cuadro 5. Especies asociadas a las distintas estructuras a lo largo de los meses de investigación.

Familia	Nombre Científico	Nombre común
Bothidae	<i>Bothus lunatus</i>	Lenguado real
Diogenidae	<i>Paguristes sericeus</i>	Cangrejo Ermitaño de ojos azules
Tetraodontidae	<i>Canthigaster rostrata</i>	Tamborín narizón
Labridae	<i>Halichoeres margaritaceus</i>	Pez labrido de vientre rosa
Labridae	<i>Halichoeres hilomeni</i>	Napoleón
Labridae	<i>Halichoeres bivittatus</i>	Doncella rayada
Labridae	<i>Leptojulis cyanopleura</i>	Labrido de punto en los hombros
Labridae	<i>Stethojulis interrupta</i>	Labrido de una línea
Dasyatidae	<i>Hypanus americanus</i>	Raya látigo blanca
Stenopodidae	<i>Stenopus hispidus</i>	Camarón boxeador
Clionidae	<i>Cliona delitrix</i>	Esponja roja aburrida
Stylasteridae	<i>Stylaster roseus</i>	Coral de encaje rosa
Milleporidae	<i>Millepora striata</i>	Coral de fuego

3.7 Comparación de viabilidad entre las estructuras estudiadas

En esta comparación se toman en cuenta distintos aspectos, como: facilidad de instalación, costo, mantenimiento, tasa promedio de crecimiento en los fragmentos (longitud total, longitud de ramificaciones y cantidad de ramificaciones).

Con base en los parámetros antes mencionados, se concluye que, en cuanto a la facilidad de instalación, el Mini Dome fue mucho más viable en

comparación con la estructura Reef Ball, debido a que fue la menos pesada y por lo tanto generó menos arrastre. Para los aspectos de costo y mantenimiento, la estructura Mini Dome sigue teniendo la ventaja frente a la Endless Reef, ya que esta última requiere de instrumentos como grúa y bote para poder ser instalada, al igual que más personas, debido a su gran peso y tamaño. La estructura Mini Dome también demanda menos mantenimiento al contar con menos superficie para limpiar.

En cuanto al tema del desarrollo y crecimiento de los fragmentos, en la estructura Endless Reef, el resultado es mucho mayor en relación con las otras estructuras. Para la longitud total por ramificaciones, la estructura Reef Ball obtuvo un mayor valor en contraste con los Mini Domes. Cabe destacar que no existen datos para el Endless Reef ya que varios fragmentos fueron dañados a causa de eventos naturales, varias etiquetas se perdieron y la toma de datos no pudo ser continua.

Cuadro 6. Comparación de viabilidad entre las estructuras estudiadas.

Estructura	Facilidad de instalación	Costo	Mantenimiento	Longitud total (cm)	LT ramificaciones(cm)	Cantidad de ramificaciones
Reef Ball	Baja	Alto	Alto	1.87	2.0	5.3
Mini Dome	Alta	Bajo	Bajo	1.32	0.94	1.6
Endless Reef	Media	Bajo	Medio	3.88	no data	3.4

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La estructura de Mini Dome fue la más fácil de instalar, también contó con muy bajo mantenimiento y bajo costo incluyendo nuestro sistema de acreción de minerales. Esto la posiciona como la más factible y eficiente económicamente para el estudio, en comparación con la estructura de Reef Ball, la cual resultó ser la más eficaz, es decir que cumple con los requerimientos del estudio realizado, pero sin optimizar los recursos.
- Endless Reef resultó ser la estructura más sobresaliente en el aspecto de longitud total, sin embargo, la estructura de Reef Ball fue la mejor para longitud total de ramificaciones y cantidad de ramificaciones nuevas.
- En cuanto a los parámetros oceanográficos, se comprobó que la temperatura y el oxígeno disuelto en el área de estudio fueron adecuados para el crecimiento de corales, aunque la salinidad elevada y el pH ligeramente bajo podrían haber afectado negativamente el desarrollo de los fragmentos. A pesar de estos factores, la profundidad del agua y la velocidad de la corriente fueron favorables, y el entorno en general continuó siendo adecuado para el crecimiento de los fragmentos, no representando una amenaza significativa para estos ecosistemas.
- Las estructuras Endless Reef, Mini Dome y Reef Ball atrajeron distintas especies de organismos, debido a que fueron utilizadas como refugio por su tridimensionalidad, lo que enriquece el área costera del sitio estudiado.

RECOMENDACIONES

- Informar a la comunidad sobre los proyectos realizados en su región para dar a conocer los beneficios del mismo y concientizar a la población sobre la importancia de la conservación y restauración de arrecifes coralinos.
- Utilizar fragmentos de distintas colonias naturales de corales en el futuro, para aumentar la variabilidad genética.
- Realizar una inmersión de reconocimiento con los voluntarios que estarán a lo largo de la investigación para que puedan practicar la toma de datos.
- Designar una persona para monitoreo de las corrientes con voltajes específicos todos los días.
- Evitar visitas turísticas a las estructuras en periodo de estudios o investigaciones ya que puede representar un cambio en la data.
- Colocar avisos sobre los cuidados que se deben tener al momento de visitar las estructuras con fragmentos, para evitar que sean deteriorados al momento de hacer observaciones turísticas.

- El etiquetado de las estructuras debe estar doblemente adherido, es decir, colocar doble o triple suncho para evitar pérdidas de etiquetas, como ocurrió con algunos fragmentos.

CAPÍTULO V. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA Y ANEXOS BIBLIOGRAFÍA

- **A.E. Douglas. (2003).** Coral bleaching—how and why?, Marine Pollution Bulletin, Volume 46, Issue 4, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00037-7).
- **Alex E. Mercado-Molina, Claudia Patricia Ruiz-Diaz, Alberto M. (2013).** Sabat, Survival, growth, and branch production of unattached fragments of the threatened hermatypic coral *Acropora cervicornis*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Volume 457, ISSN 0022-0981, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.04.017>.
- **Alex E. Mercado-Molina, Claudia Patricia Ruiz-Diaz, Alberto M. (2016).** Sabat, Branching dynamics of transplanted colonies of the threatened coral *Acropora cervicornis*: Morphogenesis, complexity, and modeling. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Volume 482, Pages 134-141, ISSN 00220981, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.05.004>.
- **Alvarado, Juan José, & Aguilar, José Francisco. (2009).** Batimetría, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en aguas del Parque Nacional Marino Ballena, Pacífico, Costa Rica. Revista de Biología Tropical, 57(Suppl. 1), 19-29. Retrieved August 13, 2023, http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003477442009000500005&lng=en&tlng=es.
- **Alvarez-Filip L, Dulvy NK, Gill JA, Côté IM, Watkinson AR. (2009).** Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. doi: 10.1098/rspb.2009.0339.
- **Arbizú, Y. S. C. (2021).** Fluctuaciones del pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y nutriente en Cayos Miskitos, municipio de Puerto Cabezas, Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN). Torreón Universitario, 10(29), 154–165.
- <https://doi.org/10.5377/rtu.v10i29.12743>

- **Baker, Andrew & Glynn, Peter & Riegl, Bernhard. (2008).** Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 80. 435471. 10.1016/j.ecss.2008.09.003.
- **Birkeland, Charles. (1988).** Geographic Comparisons of Coral-Reef Community Processes. *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp.*. 1.
- **Borell, Esther & Romatzki, Sascha & Ferse, Sebastian. (2010).** Differential physiological responses of two congeneric scleractinian corals to mineral accretion and an electric field. *Coral Reefs*. 29. 191-200. 10.1007/s00338-009-0564y.
- **Brugnoli, Allahgholi & Jorcin. (2021).** Restauración de coral a pequeña escala mediante acreción de mineral en la Isla Malapascua, Cebú, Filipinas. www.peopleandthesea.org
- **Bruno, John & Selig, Elizabeth. (2007).** Regional Decline of Coral Cover in the Indo-Pacific: Timing, Extent, and Subregional Comparisons. *PloS one*. 2. e711. 10.1371/journal.pone.0000711.
- **Boskalis. (2020).** Artificial Reefs. Panama Project (2020 - 2022). <https://boskalis.com/artificialreefs>
- **Carpenter KE, Abrar M, Aeby G, Aronson RB, Banks S, Bruckner A, Chiriboga A, Cortés J, Delbeek JC, Devantier L, Edgar GJ, Edwards AJ, Fenner D, Guzmán HM, Hoeksema BW, Hodgson G, Johan O, Licuanan WY, Livingstone SR, Lovell ER, Moore JA, Obura DO, Ochavillo D, Polidoro BA, Precth WF, Quibilan MC, Reboton C, Richards ZT, Rogers AD, Sanciangco J, Sheppard A, Sheppard C, Smith J, Stuart S, Turak E, Veron JE, Wallace C, Weil E, Wood E. (2008).** One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. doi: 10.1126/science.1159196. Epub 2008 Jul 10. PMID: 18653892.

- **Cesar, H., L. Burke, and L. Pet-Soede. (2003).** The economics of worldwide coral reef degradation. Environmental economics consulting (CEEC).
- **Cifuentes, J., Torres, M., & Frías, M. (1997).** El Océano y sus recursos. II. Las ciencias del Mar: oceanografía geológica y oceanografía química. México. <http://www.bionica.info/biblioteca/Cifuentes1997b.pdf>
- **Cohen-Sánchez, A. (2018).** Depósitos minerales obtenidos por electrolisis y sus posibles aplicaciones en restauración de arrecifes de coral. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/77971>.
- **Suchana Chavanich, Siriwan Ussavauschariyakul, Voranop Viyakarn and Toshihiko Fujita. (2013).** Influence of mineral accretion induced by electric current on the settlement and growth of the scleractinian coral *Pocillopora damicornis* (Cnidaria, Anthozoa, Hexacorallia) Reef Biology Research Group, Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 2 Department of Zoology, National Museum of Nature and Science, Tsukuba-shi, Ibaraki, Japan.
- **De Groot, R., L. Brander, S. Van Der Ploeg, R. Costanza, F. Bernard, L. Braat, M. Christie, N. Crossman, A. Ghermandi, and L. Hein. (2012).** Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1:50-61.
- **De'Ath, G. & Fabricius, K.A. & Sweatman, H. & Puotinen, Marjetta. (2012).** The 27-year decline in coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *PLoS One*. 109. 1795-1799.

- **Diaz-Pulido G, McCook LJ, Dove S, Berkelmans R, Roff G, Kline DI, Weeks S, Evans RD, Williamson DH, Hoegh-Guldberg O. (2009).** Doom and boom on a resilient reef: climate change, algal overgrowth and coral recovery. PLoS One.
- **Edwards, A. y E. Gómez. (2007).** Reef restoration: concepts and guidelines. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building For Management, Santa Lucía, Australia. 38 p.
- **Fisher, Rebecca & O'Leary, Rebecca & Lowchoy, Samantha & Mengersen, Kerrie & Knowlton, Nancy & Brainard, Russell & Caley, M. (2015).** Species Richness on Coral Reefs and the Pursuit of Convergent Global Estimates. Current biology : CB. 25. 10.1016/j.cub.2014.12.022.
- **Franco, G. D. J., Pittí, M., & Williams, E. (2019).** INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA, OXÍGENO DISUELTO Y TRANSPARENCIA EN LOS CORALES DE LA BAHÍA DE MATUMBAL, ARCHIPIÉLAGO DE BOCAS DEL TORO. Revista Epicentro, 1(1), 25-28.
- **García-Urueña, R., Garzón-Machado, M.A (2020).** Current status of *Acropora palmata* and *Acropora cervicornis* in the Colombian Caribbean: demography, coral cover and condition assessment. Hydrobiologia 847, 2141–2153 <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04238-6>
- **Gardner, T. A., I. M. Côté, J. A. Gill, A. Grant, and A. R. Watkinson. (2005).** hurricanes and caribbean coral reefs: impacts, recovery patterns, and role in longterm decline. Ecology 86:174-184.
- **Global Coral Reef Alliance. (2002).** A Solution for Corals in Peril. <http://www.globalcoral.org/oldgcra/GCRA%20Overview%204-22-2002.pdf>.

- **Global Coral Reef Alliance. (2011).** Global Coral Reef Alliance. [globalcoral.org](https://globalcoral.org/oldgcra/frequently_asked_questions.html).
https://globalcoral.org/oldgcra/frequently_asked_questions.html
- **Gómez, Fernando, Moreira, David, & López-García. (2011).** Avances en el estudio de los dinoflagelados (Dinophyceae) con la filogenia molecular. <https://www.redalyc.org/pdf/578/57821483011.pdf>
- **González Pérez, Raquel, et.al. (2011).** Los dinoflagelados, un grupo excepcional. *Ciencias* 103, julio-septiembre, 66-69.
- **Goreau, T.J. (2014).** Electrical Stimulation Greatly Increases Settlement, Growth, Survival, and Stress Resistance of Marine Organisms. *Natural Resources*, 5, 527-537. <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2014.510048>
- **Goreau-Arango. T. (2017).** Global Coral Reef Alliance. Recuperado de <http://www.globalcoral.org/author/tgoreau/page/2/>.
- **Herrera A, Alexandra M. Gooda , Alexander Hirotab , Catherine Razalc , Nicole Gaertnerb, Justin Sefcikb , Jesse Gilbertb , & Keisha D. Bahra. (2023).** Using Coral Color to Indicate Coral Health in Five Caribbean Species. DOI:[10.33697/ajur.2023.077](https://doi.org/10.33697/ajur.2023.077)
- **Hilbertz, W.H. and T.J. Goreau. (1996).** A method of enhancing the growth of aquatic organisms, and structures created thereby, U.S. patent number 5, 543, 034.
- **Hilbertz, W.H. (1992).** Solar generated building material from seawater as a sink for carbon. *Ambio* 21, 126 – 129.

- **Hughes TP, Kerry JT, Alvarez-Noriega M, Alvarez-Romero JG, Anderson KD, Baird AH, et al. (2017).** Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543:373–377.}
- **IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018).** Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- **Jackson, M. K. Donovan, K. L. Cramer, V. Y. Y. Lam. (2014).** Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970–2012 (Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN).
- **Ladrière, Ophélie & Compère, Philippe & Nicole, Decloux & Vandewalle, Pierre & Poulicek, Mathieu. (2008).** Morphological alterations of zooxanthellae in bleached cnidarian hosts. *Cahiers de Biologie Marine*. 49. 215-227. • **Levinton. J. S. (1982).** *Morini, iwlogr.* Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- **Lirman, D., Schopmeyer, S., Galvan, V., Drury, C., Baker, A. C., & Baums, I. B. (2014).** Growth dynamics of the threatened Caribbean staghorn coral *Acropora cervicornis*: influence of host genotype, symbiont identity, colony size, and environmental setting. *PloS one*, 9(9), e107253. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107253>
- **Lirman, Diego. (2016).** Manual de Restauracion de Acropora. 10.13140/RG.2.1.3636.5680.

- **Loh T, McMurray SE, Henkel TP, Vicente J, Pawlik JR. (2015).** Indirect effects of overfishing on Caribbean reefs: sponges overgrow reefbuilding corals. *PeerJ* 3:e901 <https://doi.org/10.7717/peerj.901>
- **Lough, Janice & van Oppen, Madeleine. (2008).** Introduction: Coral Bleaching — Patterns, Processes, Causes and Consequences. 10.1007/978-3-540-69775-6_1.
- **Losey. G. S. (1972).** The ecological importance of cleaning symbiosis, *Cop&* 1972: 820-833.
- **Mercado-Molina, A. E., Ruiz-Diaz, C. P., & Sabat, A. M. (2016).** Branching dynamics of transplanted colonies of the threatened coral *Acropora cervicornis*: morphogenesis, complexity, and modeling. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 482, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.05.004>
- **Margheritini, L., Moldrup, P., Jensen, R. L., Frandsen, K. M., Antonov, Y. I., Kawamoto, K., De Jonge, L. W., Vaccarella, R., Bjørgård, T. L., & Simonsen, M. E. (2021).** Innovative material can mimic coral and boulder reefs properties. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.652986>
- **Moberg, F., and C. Folke. (1999).** Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics* 29:215-233.
- **Monroy, Julio & Lonin, Serguei. (2017).** Detección, seguimiento y análisis cinemático de un giro de mesoescala a partir de observaciones in situ y datos de altimetría satelital en la cuenca Colombia–mar Caribe. *Boletín Científico CIOH*. 13-24. 10.26640/22159045.429.

- **Orión, Norzagaray-López & Calderon-Aguilera, Luis & Barranco, Linda & Cabral-Tena, Rafael & Carricart-Ganivet, Juan P. & Cupul-Magaña, Amilcar & Horta- Puga, Guillermo & López-Pérez, Andrés & Pérez España, Horacio & ReyesBonilla, Héctor & Rodríguez-Troncoso, Alma & Tortolero-Langarica, Adolfo. (2019).** Capítulo 7. Arrecifes y comunidades corallinas
- **Pérez, Gabriel & Restrepo, John. (2008).** Fundamentos de limnología Neotropical. • **Pernetta, John. (2004).** Guide to the Oceans. Buffalo, NY: Firefly Books, Inc. p. 178. [ISBN 978-1-55297-942-6](#).
- **Perrow M, Davy A. (2002).** Handbook of ecological restoration. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- **Perry CT, Steneck RS, Murphy GN, Kench PS, Edinger EN, Smithers SG, Mumby PJ. Regional-scale dominance of non-framework building corals on Caribbean reefs affects carbonate production and future reef growth. Glob Chang Biol. (2015).** Mar;21(3):1153-64. doi: 10.1111/gcb.12792. Epub 2014 Dec 23. PMID: 25537577.
- **Rogers, C.S., G. Garrison, R. Grober, Z.M. Hillis & M.A. Franke. (2001).** Manual para el monitoreo de arrecifes de coral en el Caribe y el Atlántico occidental. T.N.C. y W.W.F., Islas vírgenes, EEUU.
- **Ruppert, Edward E.; Fox, Richard, S.; Barnes, Robert D. (2004).** Invertebrate Zoology, 7th edition. Cengage Learning. p. 122. ISBN 978-81-315-0104-7.
- **Sabater, M.G., Yap, H.T. (2002).** Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO₃. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 272, 131 – 146.

- **SEMARNAT. (2018).** Programa de Acción para la Conservación de las Especies Acropora (Cuerno de Ciervo *Acropora cervicornis* y Cuerno de Alce *Acropora palmata*), SEMARNAT/CONANP, México (Año de edición 2018).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/443235/PACEAcropora.pdf>
- **Selig, E. R., K. S. Casey, and J. F. Bruno. (2012).** Temperature-driven coral decline: the role of marine protected areas. *Global Change Biology* 18:1561-1570.
- **SER (Society for Ecological Restoration). (2004).** The SER primer on ecological restoration. SER, Tucson, Arizona.
- **Shafir, S., J. van Rijn y B. Rinkevich. (2006).** Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts. *Mar. Biol.*, 149: 679687
- **Shaver EC, Silliman BR. (2017).** Time to cash in on positive interactions for coral restoration. *PeerJ* 5:20
- **Stanley Jr, G. & van de Schootbrugge, Bas. (2008).** The Evolution of the Coral– Algal Symbiosis. 10.1007/978-3-540-69775-6_2.
- **Strykowski, Joe and Rena M. Bonem. (1993).** Palaces Under the Sea. Crystal River, FL: Star Thrower Foundation, p. 31-40. Print.

- **Slattery, M., & Lesser, M. P. (2012).** Mesophotic coral reefs: a global model of community structure and function. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium 9C Ecology of mes- photic coral reefs, Cairns, Australia.
- **The Reef Ball Foundation. (2020).** Reef Ball. <http://www.reefball.com/>
- **Torres, Juan & Armstrong, Roy & Corredor, Jorge & Gilbes, Fernando. (2007).** Physiological Responses of *Acropora cervicornis* to Increased Solar Irradiance. Photochemistry and photobiology. 83. 839-50. 10.1562/2006-09-01-RA-1025.
- **Van Lunteren. (2015).** Comparing coral coverage, growth rates, and growth forms composition on a mineral accretion device during active and inactive periods. VanLunteren_2015_mineral-accretion-device-during-active-and-inactive-periods.pdf
- **Oppen, Van Madeleine & Lough, Janice. (2009).** Synthesis: Coral Bleaching — Patterns, Processes, Causes and Consequences. 10.1007/978-3-540-69775-6_11.
- **Van Treeck, P., Schuhmacher, H. (1997).** Initial survival of coral nubbins transplanted by a new coral transplantation technology: options for reef rehabilitation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 150, 287 – 292.
- **Veron, O. Hoegh-Guldberg, T.M. Lenton, J.M. Lough, D.O. Obura, P. PearceKelly, C.R.C. Sheppard, M. Spalding, M.G. Stafford-Smith, A.D. Rogers. (2009).** The coral reef crisis: The critical importance of <350ppm CO₂, Marine Pollution Bulletin, Volume 58, Issue 10. Pages 1428-1436, ISSN 0025-326X. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.09.009>.

- **Weil, E., Hammerman, N. M., Becicka, R. L., & Cruz-Motta, J. J. (2020).** Growth dynamics in *Acropora cervicornis* and *A. prolifera* in southwest Puerto Rico. *PeerJ*, 8, e8435. <https://doi.org/10.7717/peerj.8435>.
- **Wilson SK, Depczynski M, Fisher R, Holmes TH, O’Leary RA, Tinkler P. (2010).** Habitat Associations of Juvenile Fish at Ningaloo Reef, Western Australia: The Importance of Coral and Algae. *PLoS ONE* 5: e15185
- **Young,C., Schopmeyer, S., & Lirman, D. (2012).** A review of reef restoration and coral propagation using the threatened genus *acropora* in the caribbean and western atlantic. *Bulletin of Marine Science*. 88(4), 1075-1098.
- **Zárate Arévalo, J. C., Jáuregui Romero, G. A., y Rojas Ruíz, J. A. (2019).** Evaluación de morfotipos de coral *Acropora cervicornis* en guarderías colgantes para restauración. *Revista Mutis*, 9(1), 9–19. <https://doi.org/10.21789/22561498.1452>

ANEXOS



Anexo 1. *Paguristes sericeus* (Cangrejo ermitaño de ojos azules). Foto por Javier Diaz.



Anexo 2. *Stenopus hispidus* (Camarón boxeador o camarón limpiador bandeado). Foto por Javier Díaz.



Anexo 3. *Cliona delitrix* (Esponja roja aburrida). Foto por Javier Díaz.



Anexo 4. *Stylaster roseus* (Coral de encaje rosa). Foto por Javier Díaz.