

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



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Variación espacial y temporal del reclutamiento coralino y de
la supervivencia post-reclutamiento en bahía de Los Ángeles,
Baja California, México**

Tesis

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

Presenta:

Lucero Jocelyn Luna Barreda

Ensenada, Baja California, México
2021

Tesis defendida por
Lucero Jocelyn Luna Barreda

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Miembros del comité

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona

Dra. Patricia Juárez Camacho

Dr. Ramón Andrés López Pérez



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

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Lucero Jocelyn Luna Barreda © 2021

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Lucero Jocelyn Luna Barreda** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Variación espacial y temporal del reclutamiento coralino y de la supervivencia post-reclutamiento en bahía de Los Ángeles, Baja California, México

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Los arrecifes y comunidades coralinas son ecosistemas marinos de gran importancia debido a la diversidad que albergan y a los múltiples bienes y servicios que ofrecen a la sociedad. La reproducción sexual, a través del reclutamiento coralino, es la forma mediante la cual los corales se mantienen, recuperan y colonizan nuevos hábitats; este tipo de reproducción promueve la variabilidad e intercambio genético entre comunidades lo que genera que los corales tengan una mejor capacidad de adaptación y respuesta ante las condiciones del ambiente. La mayoría de los trabajos realizados en el Pacífico mexicano se encuentran enfocados al estudio del reclutamiento, pero la tasa de supervivencia después del reclutamiento es poco conocida en especial en bahía de Los Ángeles (BLA) donde no se tiene información sobre el tema. A la fecha, en la costa del Pacífico mexicano solo se ha realizado un estudio enfocado en estudiar la supervivencia post-reclutamiento en comunidades coralinas tropicales y no en aquellas ubicadas en altas latitudes como las encontradas en BLA. Las comunidades coralinas de altas latitudes tienen potencial para actuar como refugios ante el cambio climático debido a las condiciones ambientales en las que se encuentran (subóptimas para su desarrollo). El objetivo de este trabajo fue analizar las variaciones espaciales y temporales del reclutamiento coralino y de la supervivencia post-reclutamiento en dos localidades de BLA. El monitoreo del reclutamiento y la supervivencia se llevó a cabo cada tres meses utilizando sustratos artificiales y una lámpara de luz UV. Se midieron las tallas de las colonias adultas y se estimó el porcentaje de cobertura de coral vivo con el fin de determinar la relación de estas con la tasa de reclutamiento y supervivencia en cada sitio. Se encontró un total de 98 reclutas de coral todos pertenecientes a la especie *Porites panamensis*. La mayor tasa de reclutamiento ($82.30 \pm 194.08 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se registró en los meses marzo-junio y la supervivencia post-reclutamiento varió del 100 al 40.5% desde el día 0 hasta el día 202 del experimento. Este estudio representa el segundo registro sobre el reclutamiento coralino en la región y el primero en reportar la supervivencia coralina en comunidades de altas latitudes.

Palabras clave: Reclutamiento coralino, supervivencia coralina, altas latitudes, bahía de Los Ángeles.

Abstract of the thesis presented by **Lucero Jocelyn Luna Barreda** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Spatial and temporal variation of coral recruitment and post-recruitment survival in bahía de Los Ángeles, Baja California, México

Abstract approved by:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Thesis Director

Reefs and coral communities are marine ecosystems of great importance due to the diversity they harbor and the multiple goods and services they offer to society. Sexual reproduction, through coral recruitment, is how corals maintain, recover, and colonize new habitats; this type of reproduction promotes variability and genetic exchange between communities, which means that corals have a better capacity to adapt and respond to environmental conditions. Most of the studies carried out in the Mexican Pacific are focused on the study of recruitment, but the survival rate after recruitment is little known, especially in Bahía de Los Ángeles (BLA) where there is no information on the subject. To date, only one study focused on studying post-recruitment survival in tropical coral communities has been carried out on the Mexican Pacific coast and not in those located at high latitudes such as those found in BLA. The objective of this work was to analyze the spatial and temporal variations of coral recruitment and post-recruitment survival in two locations in BLA. Monitoring of recruitment and survival was carried out every three months using artificial substrates and a UV light lamp. The sizes of the adult colonies were measured, and the percentage of live coral cover was estimated to determine their relationship with the recruitment and survival rate at each site. A total of 98 coral recruits were found, all belonging to the species *Porites panamensis*. The highest recruitment rate (82.30 ± 194.08 ind m⁻² year⁻¹) was recorded in the months March-June and post-recruitment survival ranged from 100 to 40.5% from day 0 to day 202 of the experiment. This study represents the second record on coral recruitment in the region and the first to report coral survival in high-latitude communities.

Keywords: Coral recruitment, coral survival, high latitudes, Bahía de Los Ángeles.

Dedicatoria

A mis padres Leticia Barreda Amigón y Pedro Luna Rojas

A mis hermanos Pedro, Omar, Jerson y Jetro, mis compañeros de vida

A mis niñas Pao, Dani, Azul, a mi niño Omarcito y a mi cuñada

A mis abuelitos y a toda mi familia

A los que han creído en mí y me han apoyado

A todas las personas que por alguna razón no se han atrevido a luchar por sus sueños... Confía en tu potencial, recuerda que todo esfuerzo tarde o temprano trae consigo una gran recompensa así que ve y ¡hazlo posible!

“No importa lo lento que vayas siempre y cuando no te detengas”

-Confucio



Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por brindarme la oportunidad de estudiar un posgrado en Ecología Marina y por ayudarme a crecer personal y académicamente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por proporcionarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de maestría por medio de la beca 753337.

Al Proyecto de Ciencia de Frontera “FORDECYT-PRONACES 86397 Evaluación de la función geo-ecológica de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano” cuyo financiamiento hizo posible la realización de esta tesis.

Al personal de la Reserva de la Biosfera Zona Marina de Bahía de los Ángeles, Canal de Ballenas y de Salsipuedes, por las facilidades para realizar esta investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Rafael Andrés Cabral Tena, por la confianza, el apoyo, el tiempo y por todas las enseñanzas y guía que me brindó durante la elaboración de este trabajo de investigación.

A la Dra. Sharon Zinah Herzka Llona, a la Dra. Patricia Juárez Camacho y al Dr. Ramón Andrés López Pérez por sus valiosos y acertados comentarios, observaciones y aportaciones que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al M. en C. Ofir Molina González por su ingenio, por su apoyo en campo y por todo el tiempo dedicado en la construcción del material necesario para la elaboración de esta investigación.

A mis padres y a mi familia, por todo su amor y apoyo incondicional, ustedes son mi gran tesoro, lo más valioso que la vida me ha dado. Agradezco con toda mi alma y mi ser su existencia. Gracias por cuidarme, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por todo su cariño y guía, sin ustedes esto no sería posible, ¡Los amo!

A José, por sus consejos, por el apoyo en la revisión de este trabajo, por motivarme a seguir, por cuidarme en todo momento, por las risas y por todos los momentos compartidos.

A mis compañeros de generación, de laboratorio y a todas las personas que conocí durante mi estancia en la maestría, por apoyarme con las dudas de los cursos, por apoyarme emocionalmente, por cuidarme, por la compañía, por las palabras de aliento, por todas las locuras compartidas durante este periodo de mi vida y por la disposición que tuvieron siempre para ayudarme con todo lo relacionado esta investigación, trabajo de campo, dudas de trámites, dudas de los análisis estadísticos, revisión del escrito, dudas sobre temas, etc.

A todas las personas de bahía de Los Ángeles que ayudaron a que este trabajo fuera posible.

A todos los profesores que han sido parte importante de mi formación académica.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	ix
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Justificación.....	9
1.3 Hipótesis.....	9
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos específico.....	10
Capítulo 2. Metodología.....	11
2.1 Área de estudio.....	11
2.1.1 Localidades de estudio.....	12
2.2 Trabajo de campo.....	13
2.2.1 Reclutamiento coralino.....	15
2.2.2 Talla y supervivencia de reclutas.....	16
2.2.3 Talla de colonias adultas.....	16
2.2.4 Cobertura de colonias adultas.....	17
2.3 Temperatura de la superficie del mar.....	18
2.4 Análisis de datos.....	18
2.4.1 Reclutamiento coralino.....	18
2.4.2 Reclutamiento coralino vs. Temperatura de la superficie del mar (TSM).....	19
2.4.3 Talla de colonias adultas.....	20
2.4.4 Cobertura de colonias adultas.....	20

Capítulo 3. Resultados.....	21
3.1 Reclutamiento coralino.....	21
3.1.1 Talla y supervivencia de reclutas.....	22
3.2 Reclutamiento coralino vs. Temperatura de la superficie del mar (TSM).....	24
3.3 Talla de colonias adultas.....	26
3.4 Cobertura de colonias adultas.....	26
Capítulo 4 . Discusión.....	28
4.1 Reclutamiento coralino.....	28
4.1.1 Análisis temporal del reclutamiento coralino.....	30
4.1.2 Análisis espacial del reclutamiento coralino.....	30
4.2 Supervivencia de reclutas.....	31
Capítulo 5 . Conclusiones.....	34
Literatura citada.....	35

Lista de figuras

Figura		Página
1	Ciclo reproductivo general de los corales.....	3
2	Ubicación geográfica de la zona de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	13
3	Estructura utilizada para el reclutamiento coralino, considerada como una unidad experimental independiente. A) Estructura de asentamiento completa, B) Vista de la parte media, C) Vista inferior de la estructura de asentamiento.....	14
4	Acomodo de las estructuras de asentamiento en la zona de estudio. Se instalaron tres filas paralelas a la línea de costa con cinco placas de asentamiento en cada una.....	14
5	Método utilizado para el reconocimiento de los reclutas en las placas de asentamiento con ayuda de una lampara estroboscópica de luz UV (López-Pérez y Solís-García, 2019).....	15
6	Cuadrícula marcada cada 2 cm construida con tubos de PVC e hilo de poliéster encerado la cual permitió el registro de la ubicación de cada recluta presente en cada cuadrante de cada placa.....	16
7	Tallas medidas en cada colonia seleccionada al azar: A) Diámetro máximo (D_{max}), B) Diámetro mínimo (D_{min}), C) Altura de las colonias, D) Contorno de la colonia.....	17
8	Representación gráfica del método de transecto punto intercepto (PIT) para la estimación de cobertura de coral vivo.....	18
9	Promedio (\pm DE) de la supervivencia (%) y de la talla (mm) de los reclutas coralinos de la cohorte 1 (A), cohorte 2 (B) y cohorte 3 (C) asentados en sustratos artificiales durante los días de experimento en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. Negro = Supervivencia; Gris = Talla.....	23
10	Modelo de regresión lineal realizado para estimar la respuesta de la variable dependiente [tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{año}^{-1}$)] ante el cambio de la variable independiente [Temperatura de la Superficie del Mar ($^{\circ}\text{C}$)] en ambos sitio de estudio. A) Sitio <i>expuesto</i> y B) Sitio <i>protegido</i>	25

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Temporadas de estudio y el tiempo (días) que estuvieron sumergidas las placas de asentamiento antes de cada uno de los registros en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	15
2 Promedio (\pm DE) de la densidad de reclutas (ind m^{-2}) y tasa de reclutamiento coralino ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) registrada por temporada de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México	21
3 Promedio (\pm DE) de la densidad de reclutas (ind m^{-2}) y tasa de reclutamiento coralino ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) registrada por sitio de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	21
4 Resultados del Análisis de Varianza Permutacional Anidado (PERMANOVA Anidado) realizado para comparar la variación en la tasa de reclutamiento coralino entre sitios y entre temporadas en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	22
5 Promedio de la talla (\pm DE) en milímetros (mm) de todos los reclutas registrados en cada temporada de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	22
6 Resultados del modelo de regresión lineal para estimar la relación entre el promedio (\pm DE) de las Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) (26.3 ± 3.4 , 16.3 ± 1.3 y $20.5 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$) y la tasa de reclutamiento coralino en el <i>sitio expuesto</i> en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. N (tamaño muestral), t (valor estadístico de la prueba t), gl (grados de libertad) y R^2 (estimación muestral del coeficiente de determinación).....	24
7 Resultados del modelo de regresión lineal para estimar la relación entre el promedio (\pm DE) de las Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) (26.3 ± 3.4 , 16.3 ± 1.3 y $20.5 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$) y el éxito del reclutamiento coralino en el <i>sitio protegido</i> en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. N (tamaño muestral), t (valor estadístico de la prueba t), gl (grados de libertad) y R^2 (estimación muestral del coeficiente de determinación).....	24
8 Promedio (\pm DE) de tallas (cm) registradas de 32 colonias elegidas al azar en los sitios estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	26
9 Resultados de la prueba estadística t de Student realizada para comparar las tallas de 32 corales adultos elegidos al azar en ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	26

10	Promedio (\pm DE) de cobertura de coral vivo (%) y tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{año}^{-1}$) en ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	27
11	Resultados de la prueba estadística <i>t</i> de Student realizada para comparar el promedio de la cobertura de coral vivo (%) de ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México	27
12	Tasas de reclutamiento coralino registradas anteriormente en el Pacífico mexicano..	29
13	Datos de la temperatura de la superficie del mar (TSM) obtenidos del satélite MODIS-Aqua por mes (de septiembre de 2020 a junio de 2021) con una resolución espacial de 4 km. Los datos fueron tomados para el área de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.....	42
14	Categorías utilizadas en el método de transecto punto intercepto (PIT por sus siglas en inglés) para registrar lo encontrado en el fondo. En negritas lo encontrado en este estudio.....	44

Capítulo 1. Introducción

Los arrecifes y comunidades coralinas son uno de los ecosistemas marinos más diversos y productivos que existen en la Tierra; albergan a más de 100 000 especies ($\approx 10\%$ de la diversidad marina conocida) (Moberg y Folke, 1999; AIDA, 2014). Los corales generan la estructura física base del ecosistema con la cual ofrecen múltiples refugios y sustrato para la colonización de productores primarios y secundarios. Debido a esto y al alimento que proporcionan, son habitados por una gran cantidad de especies de algas, vertebrados e invertebrados (Moberg y Folke, 1999; Nava *et al.*, 2010; Ritson-Williams *et al.*, 2009). Sin embargo, su importancia no solo radica en la diversidad que albergan sino en los múltiples bienes y servicios que ofrecen a la sociedad (Moberg y Folke, 1999; Pérez-Cervantes *et al.*, 2017; Corado-Nava, 2015). Los arrecifes de coral proporcionan empleos principalmente en el turismo, sustentan actividades pesqueras comerciales y recreativas, protegen a la línea de costa ante tormentas y huracanes, entre otros, y se estima que el valor de todos estos bienes y servicios que proveen es de aproximadamente US \$500 000 ha año⁻¹ (De Groot *et al.*, 2012).

Asimismo, los corales sirven como indicadores ante las perturbaciones en el medio marino debido a que son altamente sensibles a los cambios ambientales, por lo que una perturbación, aunque sea mínima, repercute en la estabilidad de todo el sistema (Arnold *et al.*, 2010; Sneed *et al.*, 2014). Sumado a esto, es importante mencionar que en ocasiones los arrecifes están expuestos a efectos sinérgicos entre fenómenos naturales y antrópicos que provocan su deterioro e incluso la muerte de los corales, así como la extirpación y extinción de múltiples especies asociadas a estos (Bádenas y Aurell, 1999; Nava *et al.*, 2010). Actualmente, estos ecosistemas se encuentran severamente amenazados por las actividades antrópicas tales como el anclaje de botes, la contaminación, el aporte desmedido de nutrientes, las malas prácticas de buceo, la sedimentación, la sobrepesca, la minería, la deforestación y la quema de combustibles fósiles, entre otros (Fung *et al.*, 2011).

Después de una perturbación que cause daños a los arrecifes y comunidades coralinas, la forma mediante la cual los corales se recuperan y mantienen es por medio de la reproducción asexual y sexual (López-Pérez y Solís-García *et al.*, 2019). La reproducción asexual se da principalmente por fragmentación, tanto en especies ramificadas como en las no ramificadas, siendo más común en las primeras. Esto ocurre cuando las colonias coralinas se rompen debido a diferentes factores como la bioerosión, la depredación, el efecto de las tormentas y los huracanes, los cuales forman parte de los fenómenos naturales a los cuales está expuesto el ecosistema (López-Pérez *et al.*, 2007; Chávez-Romo *et al.*, 2013). Este tipo de reproducción

permite a las comunidades mantener a sus poblaciones locales al aumentar en abundancia produciendo clones adyacentes (López-Pérez *et al.*, 2007; Chávez-Romo *et al.*, 2013). Adicionalmente, la reproducción asexual permite a las especies poblar sitios donde las larvas son incapaces de asentarse (por ejemplo, en zonas arenosas en la periferia de un arrecife) y lograr una rápida colonización cuando las condiciones son desfavorables para la reproducción sexual (Highsmith, 1982; Chávez-Romo *et al.*, 2013).

Por otro lado, la reproducción sexual permite a los corales mantener, conservar y colonizar nuevos hábitats mediante la dispersión larvaria, la cual promueve la variabilidad e intercambio genético entre poblaciones. Esto aumenta la probabilidad de que los corales tengan una mejor capacidad de aclimatación, adaptación y respuesta ante las condiciones cambiantes del ambiente permitiendo así la supervivencia de estos organismos (Santiago-Valentín *et al.*, 2020), en cambio, cuando la diversidad genética es baja, el riesgo de extinción aumenta debido a su limitada capacidad para responder a los cambios en su entorno. La reproducción sexual requiere de la fusión de dos gametos (masculino y femenino) para la generación de embriones que, posteriormente, dan lugar a las larvas plánulas (Leal *et al.*, 2016).

En los corales, el desarrollo larval se puede dar mediante dos formas: las especies conocidas como desovadoras liberan gametos masculinos y femeninos a la columna del agua, donde se lleva a cabo la unión de ambos (fecundación externa) (Leal *et al.*, 2016); generalmente el periodo planctónico de las larvas es mayor a 20 días debido a que son pequeñas y no presentan zooxantelas (Fadlallah, 1983; Santiago-Valentín *et al.*, 2018). En cambio, la segunda forma de desarrollo larval ocurre en corales incubadores; en estas especies el coral macho libera los gametos a la columna de agua y el coral hembra los recibe; en este caso la fecundación es interna y la colonia hembra libera larvas ya formadas (Leal *et al.*, 2016). En estas especies, el periodo planctónico oscila entre 2 a 7 días (Fadlallah, 1983; Szmant, 1986) ya que las larvas son más grandes, presentan zooxantelas transmitidas de la colonia madre y vacuolas lipídicas que pueden proporcionar energía durante un breve periodo larvario planctónico (Santiago-Valentín *et al.*, 2019). Las pocas reservas de energía reducen su estancia en la columna de agua antes de fijarse a un sustrato. Esto disminuye su potencial de dispersión, ocasionando que el reclutamiento sea mayormente local (Fadlallah, 1983; Santiago-Valentín *et al.*, 2018). No obstante, dependiendo de la especie, las larvas pueden permanecer hasta 90 días en la columna antes de que sean estimuladas por organismos asociados al fondo que producen señales químicas que promueven el asentamiento y metamorfosis larval (Fadlallah, 1983; Harrison y Wallace, 1990; Santiago-Valentín *et al.*, 2019) (Figura 1).

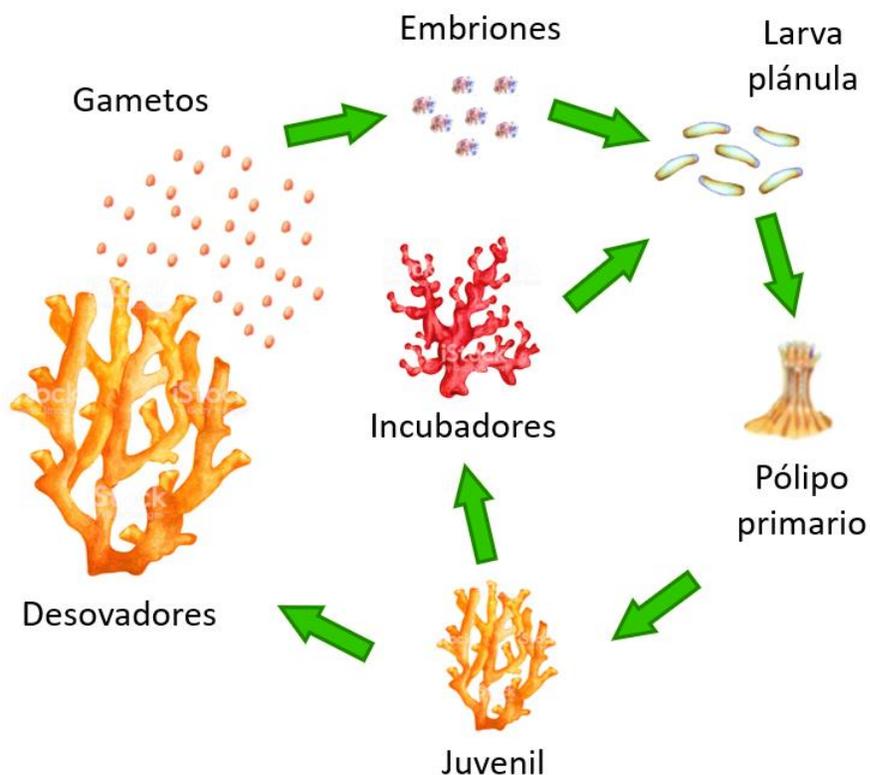


Figura 1. Ciclo reproductivo general de los corales.

Las larvas de coral pueden colonizar nuevos hábitats a través del transporte por las corrientes marinas debido a que su capacidad de desplazamiento es limitada, esto hace que las corrientes tengan una gran influencia en su distribución y establecimiento en lugares cercanos o lejanos a la colonia madre, sin embargo, el efecto de las corrientes puede verse modificado por las condiciones ambientales específicas de cada sitio y por el periodo planctónico de la larva (Arnold *et al.*, 2010).

El siguiente paso después de que las larvas se asientan en un sustrato adecuado para su desarrollo, se le conoce como reclutamiento coralino. Este es el proceso mediante el cual las larvas se establecen como nuevos miembros de la comunidad bentónica, es decir, las larvas se transforman en pólipos mediante un proceso de metamorfosis y comienzan a fijar CaCO_3 para formar su exoesqueleto (Arnold *et al.*, 2010). Cuando una larva se recluta en su comunidad de origen, se considera autoreclutamiento, el cual permite el mantenimiento y crecimiento de esa comunidad; si se recluta en una comunidad diferente a la que fue

originado, se le llama reclutamiento subsidiario, y este refleja la dispersión a gran escala y la conectividad entre diferentes poblaciones (Harrison y Wallace, 1990).

En general, la reproducción, el reclutamiento coralino y la supervivencia de los reclutas están influenciados por las condiciones del ambiente, principalmente por las variaciones en la temperatura de la superficie del mar (TSM), la luz y los nutrientes (Ritson-Williams *et al.*, 2009; Cabral-Tena *et al.*, 2018). No obstante, también han sido relacionados con otras condiciones como la edad y el tamaño del coral, los ciclos lunares, los periodos de luz/obscuridad, la sedimentación (Ritson-Williams *et al.*, 2009; Arnold *et al.*, 2010; Cabral-Tena *et al.*, 2018) y los procesos locales del movimiento del agua (López-Pérez *et al.*, 2007)

Dado que bahía de Los Ángeles (BLA) es una región que tiene una comunicación amplia con el canal de Ballenas, los vientos dominantes favorecen corrientes a lo largo de la bahía, lo cual contribuye al intercambio de las aguas con el exterior (Amador *et al.* 1991). Esta condición junto con la presencia de islas genera diferencias espaciales en el reclutamiento entre sitios expuestos a las corrientes vs. sitios protegidos por las islas (Amador *et al.* 1991). Las islas de la región se ubican en la zona central de la bahía descrita por Amador *et al.* (1991) como una de las zonas donde se presentan corrientes de baja magnitud, lo cual genera una mayor estancia de las larvas lo que estaría favoreciendo el reclutamiento en estas zonas, esto coincide con López-Pérez *et al.* (2007) quienes mencionan que el comportamiento de las larvas está estrechamente relacionado con los procesos locales del movimiento del agua que facilitan la retención de las larvas en los arrecifes nativos.

Asimismo, para que el reclutamiento coralino sea exitoso es necesaria la disponibilidad de larvas que tengan un nivel de desarrollo que las haga competentes para asentarse y la disponibilidad de un sustrato adecuado en donde la supervivencia posterior al asentamiento sea elevada (Arnold *et al.*, 2010). La capacidad de las larvas coralinas para asentarse está influenciada por las señales químicas provenientes de organismos facilitadores como bacterias, algas coralinas incrustantes y fragmentos de coral muerto, los cuales producen señales químicas que estimulan el asentamiento (Harrington *et al.*, 2004; Nystrom *et al.*, 2008). Ahora bien, cada uno de estos pasos puede verse afectado por diversos factores como, por ejemplo, un bajo tamaño poblacional coralino, el efecto de organismos depredadores y competidores (presencia de organismos sésiles bentónicos, abundancia de algas provocado por la falta de herbivoría y el aumento de nutrientes en la columna de agua) que intervienen en el proceso de reclutamiento, así como de las condiciones ambientales mencionadas anteriormente (Arnold *et al.*, 2010).

Bahía de Los Ángeles (BLA) es una región que se encuentra cerca del límite de distribución de las comunidades coralinas y es considerada como un sitio con condiciones ambientales subóptimas para el desarrollo de estas comunidades principalmente debido a la presencia de surgencias ocasionadas por los fuertes vientos y las mareas intensas que ocurren en la región, lo cual genera un amplio rango en la temperatura de la superficie del agua de mar, siendo de 15° C en invierno (enero-marzo) y llegando hasta los 30°C en verano (agosto-septiembre) (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Bernal *et al.*, 2001; Escalante *et al.*, 2013). La presencia de surgencias ocasiona un incremento en la cantidad de nutrientes que se traduce en una alta turbidez (por la alta producción de fitoplancton y zooplancton), poca penetración de luz y, al mismo tiempo, un incremento en la concentración del carbono inorgánico disuelto (DIC) que genera una baja saturación de aragonita (Ω_{arag}) y un bajo pH (Reyes-Bonilla *et al.*, 2008; Stranges *et al.*, 2019). Sin embargo, se ha sugerido que las comunidades coralinas marginales que se encuentran generalmente en latitudes superiores a los 25°, como las encontradas en BLA, tienen potencial para actuar como refugios ante el cambio climático ya que pueden ser consideradas mayormente resistentes en comparación con el resto de las comunidades del Pacífico mexicano debido a que ya viven en condiciones no óptimas para su desarrollo (por ejemplo, baja temperatura y alta cantidad de nutrientes) (Reyes-Bonilla, 2001; Halfar *et al.*, 2005).

Actualmente, en la región de bahía de Los Ángeles y, en general en el centro y norte del golfo de California, existen 13 especies de corales escleractinios, de las cuales únicamente dos son especies de corales zooxantelados y ambas son del género *Porites* (*P. panamensis* y *P. sverdrupi*; Halfar *et al.*, 2005; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008). *Porites sverdrupi* tiene una distribución geográfica restringida, y es la única especie de coral arrecifal endémico del golfo de California. Esta especie es poco abundante e incluso está considerada como una especie que se encuentra en peligro de extinción (Reyes-Bonilla, 2002; López-Pérez *et al.*, 2003). En cambio, *P. panamensis* es la especie de coral zooxantelado más abundante en la zona (~ 90% de las colonias de coral) (Halfar *et al.*, 2005; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008). Por otra parte, las especies del género *Porites* no construyen estructuras tridimensionales debido a las condiciones ambientales en las que se encuentran (Veron, 2000; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008). Para que los corales escleractinios desarrollen estructuras complejas y tridimensionales, deben encontrarse en regiones con condiciones óptimas para su crecimiento, que incluye una variación pequeña de temperatura (25-28°C), baja productividad (aguas oligotróficas), pH de 8 a 8.5 y profundidades bajas (0-50 m) (Veron, 2000; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008; Stranges *et al.*, 2019).

Porites panamensis es una especie de coral escleractinio (coral duro) zooxantelado (presencia de alga endosimbiótica en su tejido) incubador (fecundación interna) gonocórico (colonias con sexos separados)

que se encuentra distribuido únicamente en el Pacífico Oriental Tropical (POT) desde el norte del golfo de California hasta Colombia (Carpizo-Ituarte *et al.*, 2011; Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2011; Santiago-Valentín *et al.*, 2019; Santiago-Valentín *et al.*, 2020). Se ha descrito como una especie vulnerable ante condiciones ambientales locales no favorables debido a su capacidad limitada de dispersión y a su baja diversidad genética; a pesar de esto, es considerada resistente a factores ambientales estresantes (bajas temperaturas y variaciones en la cantidad de nutrientes por las surgencias), y debido a su alta plasticidad morfológica y fisiológica que le permite sobrevivir en ambientes no óptimos como lo es bahía de Los Ángeles (Cabral- Tena *et al.*, 2013; Santiago-Valentín *et al.*, 2018). Aunque su máxima actividad reproductiva es durante el verano (mayo-agosto), produce gametos maduros a lo largo de todo el año (Cabral- Tena *et al.*, 2013, 2018; Santiago-Valentín *et al.*, 2018).

1.1 Antecedentes

En los últimos años, el estudio sobre el reclutamiento coralino ha presentado una mayor atención principalmente en la zona del Indo-Pacífico y el mar Caribe. Sin embargo, en el Pacífico Oriental Tropical (POT), los estudios enfocados al reclutamiento sexual han sido pocos, en comparación con otras regiones. Los primeros estudios (debido a la poca información sobre el reclutamiento coralino que se tenía) y la baja densidad de reclutas registrada (Medina *et al.*, 2005) habían sugerido que las especies de coral en la región podrían ser sexualmente estériles y, por lo tanto, las especies del POT dependían completamente de la fragmentación para mantener a sus poblaciones locales (Richmond, 1981; Highsmith, 1982).

Dentro de los trabajos realizados en el Pacífico mexicano que versan sobre el reclutamiento coralino, se encuentra el de Medina-Rosas *et al.* (2005), quienes utilizaron sustratos artificiales para realizar un monitoreo mensual de diciembre de 1998 hasta julio de 1999 en bahía Banderas (Jalisco y Nayarit). Los autores reportaron valores promedio de reclutamiento de $2.87 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Este estudio representa el primer registro de reclutamiento del género *Porites* spp en sustratos artificiales en el Pacífico mexicano. Asimismo, el estudio revela que las comunidades de esa zona no se mantienen por la llegada de larvas de otras zonas del Pacífico y que, a pesar de las perturbaciones a las que estuvieron expuestas durante El Niño 97-98, estas comunidades mantuvieron su actividad reproductiva principalmente por reproducción sexual (Medina-Rosas *et al.*, 2005; Carpizo-Ituarte *et al.*, 2011).

Del mismo modo, López-Pérez *et al.* (2007) realizaron un análisis de los patrones de reclutamiento sexual y asexual (fragmentación) durante un ciclo anual (de enero de 2001 hasta enero de 2002) en distintas localidades de bahías de Huatulco, Oaxaca. Los autores utilizaron sustratos artificiales para estimar el reclutamiento por reproducción sexual y censos visuales (cuadrantes) para evaluar el reclutamiento originado por la fragmentación de la colonia madre. Se registraron 292 reclutas de coral, 291 de *P. panamensis* y uno de *Pocillopora* spp, siendo esta última la única que presentó reclutamiento por fragmentación (asexual), los resultados evidenciaron que principalmente el reclutamiento sexual en la región es de gran importancia para la aparición y mantenimiento de las comunidades locales y potencialmente de gran parte del Pacífico Oriental. Los autores también reportaron una tasa de reclutamiento que varió entre los 0.85 y 20.4 ind m⁻² año⁻¹ lo cual a su vez se usa para inferir el potencial de recuperación de una comunidad, los autores sugirieron que la recuperación después de una perturbación es altamente específica de la especie, es decir, *P. panamensis* puede recuperarse relativamente rápido en comparación con *Pocillopora* spp. quien presenta una tasa de recuperación más lenta, no obstante, *Pocillopora* spp. es quien puede contribuir en gran medida a la cobertura coralina a través del reclutamiento por fragmentación (López-Pérez *et al.*, 2007).

Asimismo, Cabral-Tena *et al.* (2018) utilizaron sustratos artificiales para caracterizar la variación espacial y temporal del reclutamiento coralino producto de la reproducción sexual entre agosto de 2004 y septiembre de 2005 en bahía de La Paz y bahía de Loreto, Baja California Sur. Estas comunidades presentan condiciones ambientales subóptimas para el establecimiento coralino. Se encontraron reclutas en la mayoría de las localidades y se documentó un aumento en el reclutamiento durante el verano. Los reclutas pertenecieron a cinco géneros de coral, siendo *Porites* el que presentó mayor abundancia de reclutas, y sus valores del reclutamiento fueron comparables con otros sitios del Pacífico Oriental que presentan condiciones favorables para los corales, lo cual indica que incluso bajo condiciones estresantes, las comunidades son capaces de mantenerse. En este estudio se registró la segunda tasa de reclutamiento de *Porites* más alta del Pacífico Oriental (Cabral-Tena *et al.*, 2018).

También, Santiago-Valentín *et al.* (2019) realizaron un análisis de la reproducción sexual de *Porites panamensis* en Islas Marías, Nayarit, con el fin de describir el comportamiento reproductivo de *P. panamensis*, con un enfoque en el uso de herramientas moleculares para documentar la evidencia de una etapa planctónica larvaria para un reclutamiento exitoso. Los autores estimaron el reclutamiento coralino en sustratos naturales y artificiales entre septiembre de 2015 y octubre de 2016. Los resultados mostraron una tasa promedio de reclutamiento de 7.61 ind m⁻² año⁻¹, asimismo, evidencian el potencial que tiene *P. panamensis* para mantener a su población en el área de estudio y para contribuir al mantenimiento de la

comunidad de arrecifes de coral en los próximos años. Además, López-Pérez *et al.*, 2015, mencionan que las Islas Marías tienen gran potencial para la dispersión de especies de coral debido a la alta cobertura coralina y el patrón de corrientes que permite el intercambio de especies entre el archipiélago de Revillagigedo, el golfo de California y el Pacífico tropical mexicano. Del mismo modo, las Islas Marías pueden desempeñar un papel fundamental en el mantenimiento de la conectividad genética entre las poblaciones de coral a lo largo de todo el Pacífico mexicano (López-Pérez *et al.*, 2015).

Por otra parte, López-Pérez y Solís-García (2019) evaluaron, espacial y temporalmente, el asentamiento y mortalidad coralina mensualmente durante dos años (2009-2011) en el Pacífico Sur mexicano a través del uso de sustratos artificiales y una lámpara fluorescente que permitió una mejor observación y ubicación de los reclutas. En ese estudio, se registró una tasa baja de reclutamiento coralino en comparación con otras zonas del Pacífico Sur mexicano, y los autores sugirieron que fue consecuencia del evento El Niño 2010-2011. En algunas de las localidades de estudio, *P. panamensis* presentó una tasa alta de asentamiento lo que sugiere que el suministro de larvas y las condiciones del ambiente que repercuten en el asentamiento varían espacial y temporalmente. No obstante, los reclutas presentaron una mortalidad de entre el 20 y el 100% durante los primeros días después de haberse establecido en el sustrato, aunque esta se estabilizó con el tiempo. Los resultados llevaron a los autores a sugerir que a pesar de que *P. panamensis* es una especie colonizadora, *Pocillopora* spp. es un mejor competidor (López-Pérez y Solís-García, 2019).

Finalmente, Tejada-Begazo (2020) realizó un análisis sobre el reclutamiento coralino y su variación durante un ciclo anual en bahía de Los Ángeles, Baja California, México, utilizando sustratos artificiales en las comunidades coralinas; la autora registró 146 reclutas de coral pertenecientes a dos especies, *Astrangia haimeii* y *P. panamensis*, siendo esta última la más abundante con la mayor tasa promedio de reclutamiento durante el verano-otoño ($1.84 \text{ ind m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Sin embargo, *Astrangia haimeii* presentó una mayor tasa promedio de reclutamiento durante la temporada primavera-verano ($0.18 \text{ ind m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Asimismo, Tejada-Begazo (2020) relacionó la temperatura de la superficie del mar y la concentración de clorofila *a* con el reclutamiento coralino en la región; ambas variables mostraron una relación directa con el reclutamiento de *P. panamensis*. En cambio, para *A. haimeii*, estos parámetros no mostraron relación con el reclutamiento. Este trabajo reporta la mayor tasa de reclutamiento coralino de *P. panamensis* en el Pacífico mexicano ($63.04 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), en una localidad con condiciones ambientales subóptimas para su desarrollo y, además, representa el primer registro de *A. haimeii* en un trabajo sobre reclutamiento coralino para el Pacífico Oriental.

1.2 Justificación

La reproducción sexual introduce variación genética en las poblaciones, lo cual aumenta la probabilidad de que los corales tengan una mejor capacidad de aclimatación, adaptación y respuesta ante las condiciones del ambiente. Este tipo de reproducción es esencial para el mantenimiento, la recuperación y la supervivencia de las comunidades coralinas y al mismo tiempo nos permite entender la dinámica poblacional de los corales presentes en el golfo de California, en especial en bahía de Los Ángeles (BLA), región ubicada en alta latitud.

En los últimos años, las comunidades de coral de altas latitudes han recibido una mayor atención debido a las condiciones ambientales en las que existen, condiciones que han sido catalogadas como subóptimas para su desarrollo. Se ha sugerido que las comunidades coralinas ubicadas en latitudes superiores a los 25° tienen potencial para actuar como refugios ante el cambio climático (Beger *et al.*, 2014), ya que podrían ser más resistentes y estar mejor adaptadas para sobrevivir porque ya habitan en condiciones subóptimas (p. ej. baja temperatura y alta cantidad de nutrientes).

A la fecha, en la costa del Pacífico mexicano sólo se ha realizado un trabajo enfocado en estudiar la supervivencia post-reclutamiento en comunidades coralinas tropicales y no en aquellas ubicadas en altas latitudes como las encontradas en BLA. Por ello, entender el proceso de reclutamiento y supervivencia post-reclutamiento es importante y necesario para conocer el potencial de supervivencia y recuperación que poseen las comunidades locales de BLA para su crecimiento a futuro (Halfar *et al.*, 2005).

1.3 Hipótesis

- Considerando que la reproducción de los corales escleractinios está asociada a un aumento en la temperatura de la superficie del mar, se espera una mayor tasa de reclutamiento durante la temporada más cálida.
- Dado que la talla, cobertura y rugosidad de los corales escleractinios en bahía de los Ángeles difiere espacialmente, se espera que la tasa de reclutamiento, así como la tasa de supervivencia sean altas en donde estos parámetros sean mayores.

- Teniendo en cuenta que los corales exhiben una mayor tasa de mortalidad durante el periodo siguiente a su asentamiento, se espera que en esta etapa la tasa de supervivencia sea baja y variable, pero conforme crecen y los reclutas adquieran una mayor talla, la supervivencia sea mayor y menos variable.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar las variaciones espaciales y temporales del reclutamiento coralino y de la supervivencia post-reclutamiento durante un ciclo anual (2020-2021) utilizando sustratos artificiales en dos localidades de bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estimar la tasa de reclutamiento coralino.
- Caracterizar el patrón temporal del reclutamiento coralino.
- Estimar la tasa de supervivencia post-reclutamiento.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

El golfo de California es un mar marginal semicerrado ubicado en el noroeste de México, es considerado como un laboratorio natural debido a la gran diversidad que alberga y a que es uno de los ecosistemas marinos más productivos ($> 300 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2001; Escalante *et al.*, 2013; Ayala-Bocos *et al.*, 2016). El golfo ha sido dividido en cuatro regiones topográficas marcadas por procesos físicos y características hidrográficas que controlan la circulación y la estructura termohalina: 1. Alto golfo de California, 2. La región de las grandes islas, 3. El centro y 4. La boca del golfo (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Escalante *et al.*, 2013). La región de las grandes islas se caracteriza por tener una alta salinidad superficial y una mezcla vertical muy marcada debido al efecto de las surgencias y mareas, lo que a su vez, genera una alta productividad en la zona durante el invierno y primavera y, una baja productividad durante el verano cuando el agua superficial es cálida y se encuentra estratificada; esta zona presenta las temperaturas más bajas en invierno en comparación con el resto del golfo (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Escalante *et al.*, 2013).

Bahía de Los Ángeles se localiza en la región de las grandes islas, en la costa oriental del estado de Baja California, México, a 540 Km al sur del municipio de Ensenada; se extiende entre los $28^{\circ} 56' 14''$ latitud norte y los $113^{\circ} 33' 21''$ longitud oeste (Peregrín, 2014). Desde el 7 de junio de 2007, forma parte de la Reserva de la Biosfera Zona Marina bahía de Los Ángeles, Canal de Ballenas y de Salsipuedes, la cual cubre una superficie de 387 957 hectáreas (SEMARNAT-CONANP, 2014; INEGI, 2017).

La zona presenta un clima árido extremo, con veranos calientes, alta radiación solar, tasas de evaporación elevadas y vientos variables; los inviernos son fríos y están altamente influenciados por la parte desértica de la península (Cavazos, 2008). La región se caracteriza por una alta variabilidad en la precipitación con una media anual de 60.5 mm^3 . La precipitación anual muestra una distribución bimodal, con máximos en septiembre y diciembre; en septiembre las lluvias son ocasionadas principalmente por huracanes y tormentas tropicales, las de fin de año son invernales y ocurren de forma esporádica (Cavazos, 2008). La temperatura media anual en bahía de los Ángeles es de 22.7°C , con mínimos durante los meses de enero y febrero (11 y 14°C) y temperaturas máximas durante los meses de julio y agosto (35 a 40°C) (Cavazos, 2008; SEMARNAT-CONANP, 2014).

En el canal de Ballenas existe una entrada profunda de masas de agua tanto en su entrada sur como en su entrada norte, y esta convergencia en la profundidad implica una divergencia en la superficie, con flujo de agua hacia fuera del canal en ambas entradas, hacia el norte y hacia el sur (Álvarez-Borrego *et al.*, 2008; López *et al.*, 2006). Estos movimientos son los principales responsables de la formación de surgencias en la región, es decir, las surgencias además de tener relación con las corrientes de marea que suelen ser muy intensas (Álvarez-Borrego, 2008) también se originan por la interacción de las corrientes profundas y “sills” (López *et al.*, 2006). La circulación es la responsable de la temperatura de la superficie del mar relativamente baja y la alta productividad en la región (Álvarez-Borrego *et al.*, 2008; López *et al.*, 2006).

Además, la presencia de las surgencias ocasiona una disminución del pH en la superficie debido al surgimiento de aguas profundas que tienen un valor pH menor como consecuencia de la remineralización de la materia orgánica a través del tiempo (Cortés-Lara *et al.* 1999), presentando, en esta zona, los valores más bajos en comparación con el resto del golfo de California (pH 8.1) (Halfar *et al.*, 2005; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008; Álvarez-Borrego, 2010; Stranges *et al.*, 2019). La profundidad máxima de la bahía es de 35 m en la zona sur y de 50 m en la zona norte (Álvarez-Borrego, 2010). En el caso de las mareas, estas presentan una amplitud aproximada de un metro (Amador *et al.*, 1991).

La temperatura de la superficie del mar y el patrón de vientos presentan una marcada oscilación estacional, con condiciones templadas (14°C) y vientos intensos y muy variables (vientos fuertes del noroeste en invierno y primavera) y, con condiciones tropicales (28°C) y vientos del sureste en verano y otoño. Es decir, las temperaturas más bajas se presentan en enero-febrero (14-15°C) y las más altas entre julio y agosto (28-31°C) (Peregrín, 2014; SEMARNAT-CONANP, 2014). La salinidad de la superficie en el mar abierto varía entre 35 y 36‰, y en las aguas costeras varía de 36‰ en invierno hasta 39‰ en verano (SEMARNAT-CONANP, 2014).

2.1.1 Localidades de estudio

El monitoreo del reclutamiento se realizó en dos sitios de la periferia de la isla Llave, denominados, en este estudio, sitio *expuesto* (28°59′53.1″ N 113°31′14.5″ W) y sitio *protegido* (28°59′57.1″ N 113°31′11.1″ W) (Figura 2). Isla Llave se encuentra deshabitada y forma parte de la Reserva de la Biosfera bahía de Los Ángeles, Canales de Ballenas y Salsipuedes; se encuentran muy cerca de isla Cerraja, de modo que su orografía parece encajar, de ahí el nombre de cada una de ellas (SEMARNAT-CONANP, 2014).

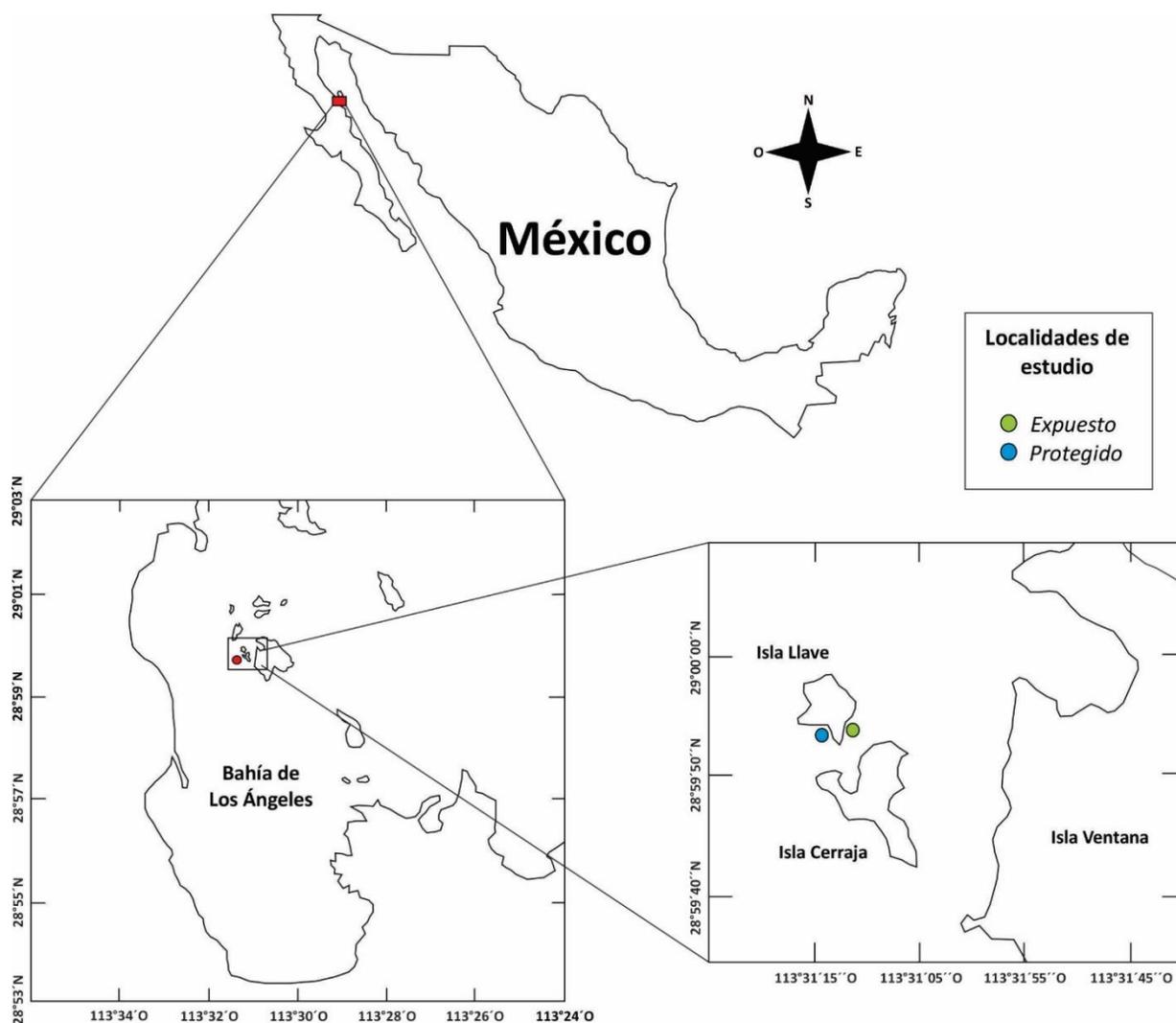


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

2.2 Trabajo de Campo

El monitoreo del reclutamiento coralino y de la supervivencia post-reclutamiento se realizó mediante la instalación de sustratos artificiales en cada una de las comunidades coralinas. En cada localidad se colocaron 15 placas de asentamiento (consideradas, cada una, como unidades experimentales independientes), construidas con una loseta de terracota de 20 x 20 cm, un tabique perforado de barro, cuatro rondanas planas, una rondana de presión, seis tuercas (3/8) y una varilla (3/8) de 20 cm de largo; las rondanas, las tuercas y la varilla fueron de acero inoxidable (Figura 3). Las estructuras se colocaron

entre 3 y 6 metros de profundidad aproximadamente, el cual es el intervalo en el cual se encuentran las colonias de coral, y estas fueron fijadas a las rocas del fondo con cuerda alquitranada.

Las placas de asentamiento se colocaron formando tres filas (con cinco placas cada una) paralelas a la línea de costa. Entre cada fila hubo una separación de aproximadamente 1 m y entre cada placa de asentamiento dentro de una misma fila la separación fue de aproximadamente 50 cm (Figura 4). Finalmente, todas las unidades experimentales fueron etiquetadas para su posterior identificación y control durante el registro de datos.

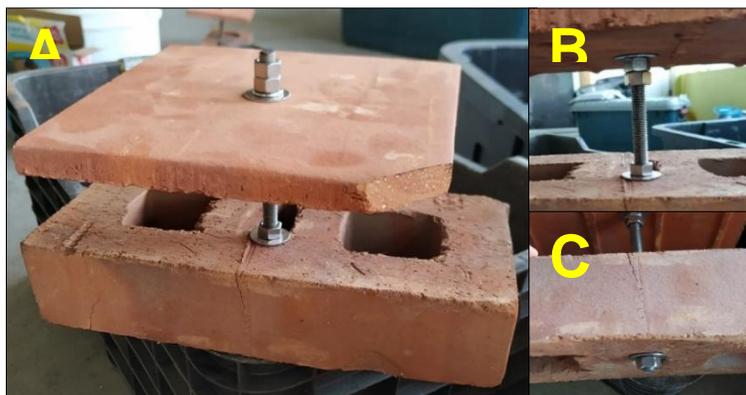


Figura 3. Estructura utilizada para el reclutamiento coralino, considerada como una unidad experimental independiente. A) Estructura de asentamiento completa, B) Vista de la parte media, C) Vista inferior de la estructura de asentamiento.



Figura 4. Acomodo de las estructuras de asentamiento en la zona de estudio. Se instalaron tres filas paralelas a la línea de costa con cinco placas de asentamiento en cada una.

2.2.1 Reclutamiento coralino

Las placas de asentamiento fueron colocadas el 2 de septiembre de 2020 y se mantuvieron sumergidas durante todo el experimento. Posteriormente, cada tres meses (diciembre, marzo y junio), se llevó a cabo el registro de los reclutas (Tabla 1). El reconocimiento de los reclutas en cada una de las placas se llevó a cabo con una lampara estroboscópica de luz UV , ya que estos emiten fluorescencia en presencia de este tipo de luz (Quick *et al.*, 2018; Salih *et al.*, 2000), lo cual facilitó su observación e identificación (Figura 5).

Tabla 1. Temporadas de estudio y el tiempo (días) que estuvieron sumergidas las placas de asentamiento antes de cada uno de los registros en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Trabajo de campo	Temporada	Tiempo sumergido (días)
Instalación de estructuras	septiembre	0
1er registro	septiembre-diciembre	98
2do registro	diciembre-marzo	202
3er registro	marzo-junio	294



Figura 5. Método utilizado para el reconocimiento de los reclutas en las placas de asentamiento con ayuda de una lampara estroboscópica de luz UV (López-Pérez y Solís-García, 2019).

2.2.2. Talla y supervivencia de reclutas

Una vez realizada la identificación de los reclutas, con ayuda de un vernier de plástico se hizo el registro del diámetro de cada uno. Asimismo, con una cuadrícula (construida con tubos de PVC e hilo de poliéster) marcada cada dos centímetros, se anotó la ubicación de los reclutas dentro de cada placa con la finalidad de tenerlos ubicados a lo largo del tiempo y así poder estimar el porcentaje de la supervivencia coralina a lo largo todo el muestreo (Figura 6). Finalmente, a cada placa, se le tomó una fotografía para llevar un registro. Los reclutas que no presentaron fluorescencia o que fueron menores a 2 mm de diámetro fueron descartados del registro debido a que la ausencia de fluorescencia es indicativa de la falta de zooxantelas en su tejido, asimismo, su tamaño pequeño puede ocasionar que sean confundidos con otros organismos.



Figura 6. Cuadrícula marcada cada 2 cm construida con tubos de PVC e hilo de poliéster encerado la cual permitió el registro de la ubicación de cada recluta presente en cada cuadrante de cada placa.

2.2.3. Talla de colonias adultas

Para determinar la relación de las tallas de las colonias adultas con la tasa de reclutamiento coralino en cada sitio, se midieron el diámetro máximo (D_{max}), el diámetro mínimo (D_{min}) y la altura de 32 colonias elegidas al azar (15 en el sitio *expuesto* y 17 en el sitio *protegido*) con una cinta métrica. También se midió el contorno de cada una de estas a fin de calcular la rugosidad (R) (Anexo B) de cada una y con ello poder estimar la complejidad del fondo marino (Figura 7). Las tallas fueron medidas durante el muestreo de diciembre de 2020.

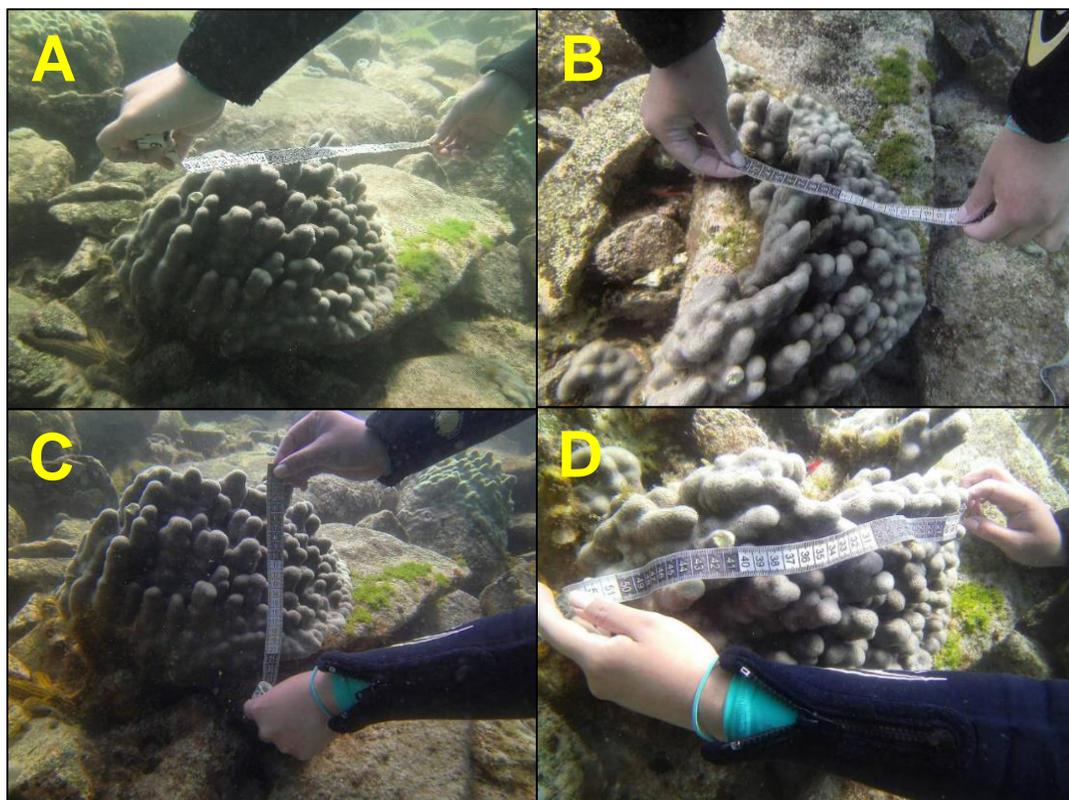


Figura 7. Tallas medidas en cada colonia seleccionada al azar: A) Diámetro máximo (D_{max}), B) Diámetro mínimo (D_{min}), C) Altura de las colonias, D) Contorno de la colonia.

2.2.4. Cobertura de colonias adultas

Se llevó a cabo el método de transecto punto intercepto (PIT por sus siglas en inglés) para estimar el porcentaje de cobertura de coral vivo presente en cada uno de los sitios de estudio, durante el muestreo de marzo de 2020. Se colocaron ocho transectos: seis en el sitio *expuesto* y dos en el sitio *protegido*. Cada transecto fue de 10 m de longitud y se colocaron paralelos a la línea de costa a 4 m de profundidad con una separación de 1 m entre cada uno. Los transectos se marcaron cada 10 cm para registrar lo encontrado en el fondo en cada uno de estos puntos (Figura 8, Anexo C).

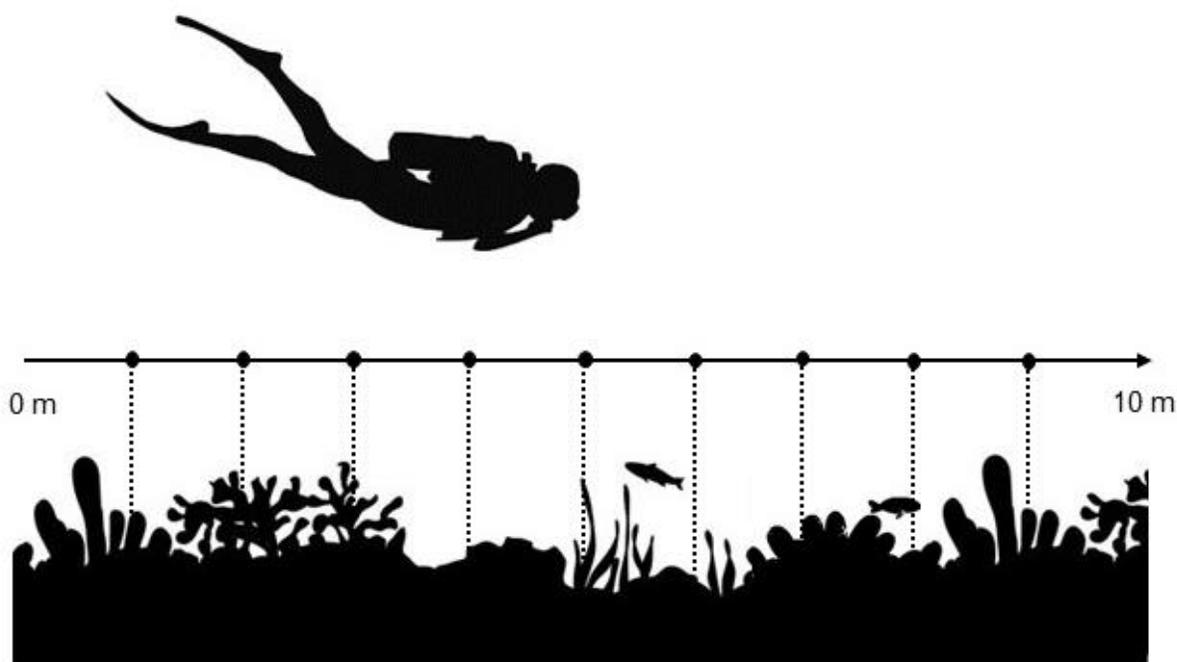


Figura 8. Representación gráfica del método de transecto punto intercepto (PIT) para la estimación de cobertura de coral vivo.

2.3 Temperatura de la superficie del mar (TSM)

Los datos de la temperatura de la superficie del mar (TSM) fueron obtenidos del satélite MODIS-Aqua, en la página <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/Mapped/Monthly/4km/sst/>. La TSM se registró cada mes (de septiembre de 2020 a junio de 2021) con una resolución espacial de 4 km; los datos fueron procesados en el programa SeaDAS (versión 7.5.3) (Anexo A).

2.4 Análisis de datos

2.4.1 Reclutamiento coralino

Se calculó la tasa de reclutamiento coralino utilizando la densidad de los reclutas y el tiempo en el que las placas de asentamiento estuvieron sumergidas. La tasa de reclutamiento se calculó de la siguiente manera:

Densidad de reclutas (D): Permite estimar el número de individuos en un área determinada; para ello se contó el número de individuos encontrados (η) y se dividió entre el área de las placas en m^2 (A).

$$D = \frac{\eta}{A} \quad (1)$$

Tasa de reclutamiento (Tr): Permite estimar la cantidad de individuos en un tiempo determinado; para ello se dividió la densidad de reclutas obtenida (D) entre el tiempo (t) en el que las placas permanecieron sumergidas (días).

$$Tr = \frac{D}{t} \quad (2)$$

La densidad de reclutas se reporta como $\text{ind } m^{-2}$ y la tasa de reclutamiento como $\text{ind } m^{-2} \text{ año}^{-1}$.

En vista de que los datos obtenidos de la densidad de los reclutas y de la tasa de reclutamiento no cumplieron con los supuestos de normalidad (prueba de Kolmogorov-Smirnov) y homocedasticidad de varianza (prueba de Bartlett), se llevó a cabo un Análisis de Varianza Permutacional Multivariado Anidado (PERMANOVA anidado) con base en una matriz de Distancia Euclidiana, con el fin de detectar diferencias estadísticas entre las temporadas para cada sitio. Este análisis se realizó utilizando la paquetería “vegan” en el programa estadístico R (versión 3.6.1).

2.4.2 Reclutamiento coralino vs. temperatura de la superficie del mar (TSM)

Con el fin de analizar la relación entre el reclutamiento coralino y la temperatura de la superficie del mar, se realizó una regresión lineal utilizando el programa estadístico R (versión 3.6.1) y el programa estadístico PAST (versión 3.26) para la construcción de los gráficos. El análisis se realizó con el promedio de la tasa de reclutamiento coralino ($\text{ind } m^{-2} \text{ año}^{-1}$) de cada sitio vs. la TSM ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.3 Talla de colonias adultas

Dado que los datos de las tallas de las 32 colonias elegidas al azar cumplieron con los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad de varianza (prueba de Bartlett) se realizó una prueba paramétrica *t* de Student con el propósito de conocer si las diferencias entre ambos sitios de estudio respecto a cada una de las tallas (diámetro máximo, diámetro mínimo, altura y rugosidad) de las colonias adultas eran significativas. Dicha prueba se realizó en el programa estadístico R (versión 3.6.1).

2.4.4 Cobertura de colonias adultas

Asimismo, para contrastar el promedio (\pm DE) del porcentaje de cobertura de coral vivo y averiguar si las diferencias entre sitios eran significativas, se realizó una prueba estadística *t* de Student en el programa estadístico PAST (versión 3.26).

Capítulo 3. Resultados

3.1. Reclutamiento coralino

Se encontraron un total de 98 reclutas coralinos pertenecientes a la especie *Porites panamensis*. Diez reclutas fueron encontrados tras la permanencia de las placas en el agua entre septiembre y diciembre, ocho durante diciembre-marzo y 80 durante marzo-junio (Tabla 2). En relación con los sitios de estudio, siete de estos reclutas fueron encontrados en el sitio *expuesto* y 91 en el sitio *protegido* (Tabla 3).

La densidad de reclutas y la tasa de reclutamiento variaron entre muestreos y sitios. En los meses marzo-junio, cuando la temperatura aumentó hasta los $20.5 \pm 2.9^\circ\text{C}$, se encontró la mayor densidad de reclutas ($66.7 \pm 157.2 \text{ ind m}^{-2}$) y la mayor tasa de reclutamiento ($82.3 \pm 194.1 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). En cambio, la menor densidad de reclutas ($6.67 \pm 13.02 \text{ ind m}^{-2}$) y la menor tasa de reclutamiento ($12.1 \pm 23.7 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se registró durante diciembre-marzo, cuando la temperatura descendió hasta los $16.3 \pm 1.3^\circ\text{C}$ (Tabla 2). Por otro lado, el sitio *protegido* presentó la mayor densidad de reclutas ($50.6 \pm 130.3 \text{ ind m}^{-2}$) y tasa de reclutamiento ($73.3 \pm 163.6 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) en todo el muestreo (Tabla 3).

Tabla 2. Promedio (\pm DE) de la densidad de reclutas (ind m^{-2}), tasa de reclutamiento coralino ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y temperatura ($^\circ\text{C}$) registrada por temporada de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Temporada	Número de reclutas	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Densidad (ind m^{-2})	Tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)
septiembre-diciembre	10	$26.3 \pm 3.4^*$	8.3 ± 17.8	30.9 ± 65.9
diciembre-marzo	8	$16.3 \pm 1.3^*$	6.7 ± 13.0	12.1 ± 23.7
marzo-junio	80	$20.5 \pm 2.9^*$	66.7 ± 157.2	82.3 ± 194.1

* Temperatura promedio de cada temporada (\pm DE).

Tabla 3. Promedio (\pm DE) de la densidad de reclutas (ind m^{-2}) y tasa de reclutamiento coralino ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) registrada por sitio de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Sitio	Número de reclutas	Densidad (ind m^{-2})	Tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)
Expuesto	7	3.9 ± 10.6	10.2 ± 32.5
Protegido	91	50.6 ± 130.3	73.3 ± 163.6

El análisis estadístico (PERMANOVA anidado) realizado para comparar la tasa de reclutamiento entre las temporadas dentro de cada sitio, mostró diferencias estadísticas entre sitios ($p = 0.002$); en el sitio *protegido* se encontró la mayor tasa de reclutamiento coralino (Tabla 3). Por su parte, el reclutamiento varió significativamente a través del tiempo anidado en el factor Sitio ($p = 0.003$), lo sugiere que hay diferencia estadística en la tasa de reclutamiento entre las temporadas en el sitio *expuesto*, así como entre temporadas en el sitio *protegido* (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del Análisis de Varianza Permutacional Anidado (PERMANOVA Anidado) realizado para comparar la variación en la tasa de reclutamiento coralino entre sitios y entre temporadas en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Factor	<i>gl</i>	Pseudo - <i>F</i>	R ²	valor de <i>p</i>
Sitio	1	7.33	0.07	0.002*
Temporada (Sitio)	4	4.05	0.15	0.003*
Residuales	84		0.78	
Total	89		1.00	

*valores significativos $p < 0.05$

3.1.1 Talla y supervivencia de reclutas

Los reclutas registrados durante todo el experimento fueron monitoreados con el fin de estimar el porcentaje promedio de supervivencia, así como, la talla promedio de estos a lo largo del estudio. El diámetro de todos los reclutas coralinos encontrados sobre los sustratos artificiales a lo largo del estudio varió de 2 a 6 mm. El diámetro promedio fue de 2.5 ± 0.5 mm a los 98 días del experimento, de 3.8 ± 1.7 a los 202 días y de 2 ± 0 a los 294 días (Tabla 5). El diámetro de los reclutas no se comportó de acuerdo con lo esperado (aumento gradual de las tallas a lo largo del tiempo del experimento), lo cual está relacionado con la presencia de diferentes cohortes de reclutas a lo largo del estudio que provocaron una disminución en el promedio de los diámetros.

Tabla 5. Promedio de la talla (\pm DE) en milímetros (mm) de todos los reclutas registrados en cada temporada de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Temporada	Días de experimento	Talla de reclutas (mm)
septiembre-diciembre	98	2.5 ± 0.5
diciembre-marzo	202	3.8 ± 1.7
marzo-junio	294	2.0 ± 0

Por otro lado, la supervivencia de los reclutas que se establecieron al inicio del experimento (cohorte 1) varió de 100 a 40.5% del día 0 al día 202. Sin embargo, la talla promedio de la cohorte 1 aumentó de 2.5 ± 0.5 a 5.2 ± 0.5 mm durante el mismo periodo de tiempo. Para el día 294, la supervivencia de la cohorte 1 fue de 0% (Figura 9A).

A pesar de que la primera cohorte de reclutas coralinos sólo sobrevivió hasta el día 202, se presentaron nuevas cohortes de reclutas a los 202 y a los 294 días del experimento. La cohorte 2 que fue registrada en el día 202 con una talla promedio de 2.3 ± 0.5 mm y tuvo una supervivencia de 0% en el día 294 (Figura 9B). Finalmente, al término del experimento (día 294) se registró una tercera cohorte de reclutas con una talla promedio de 2 ± 0 mm (Figura 9C).

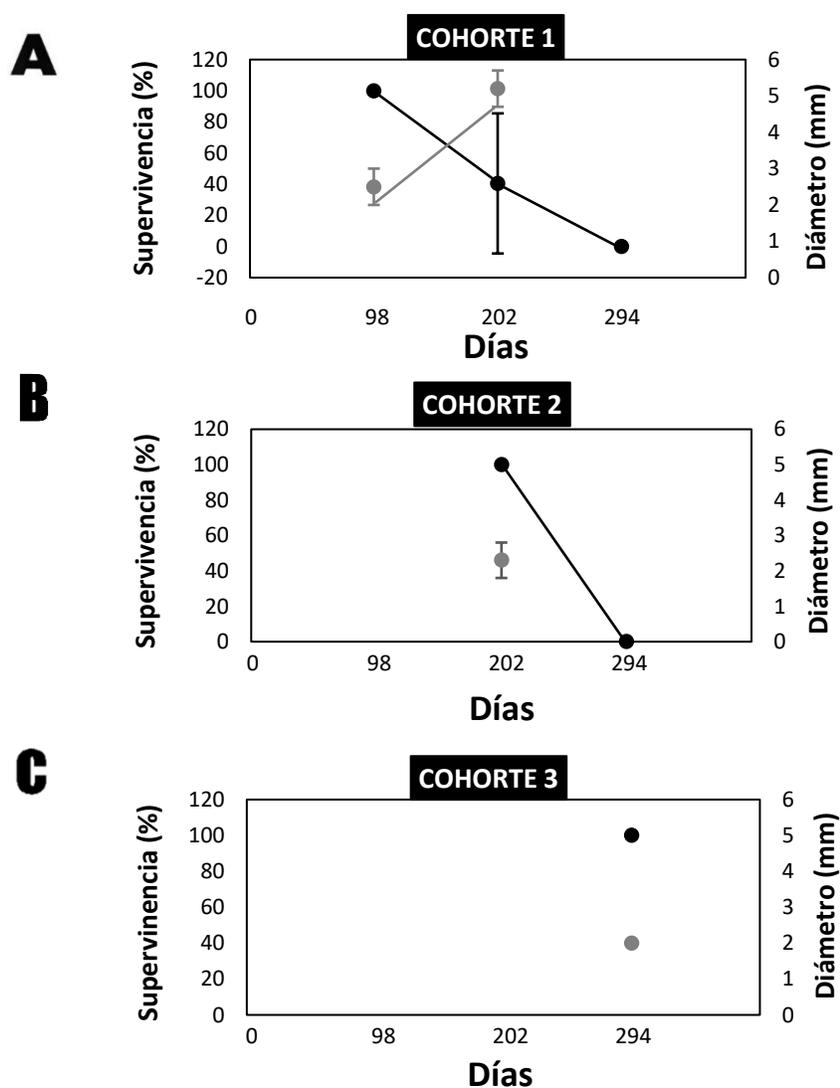


Figura 9. Promedio (\pm DE) de la supervivencia (%) y de la talla (mm) de los reclutas coralinos de la cohorte 1 (A), cohorte 2 (B) y cohorte 3 (C) asentados en sustratos artificiales durante los días de experimento en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. Negro = Supervivencia; Gris = Talla.

3.2 Reclutamiento coralino vs. temperatura de la superficie del mar (TSM)

Los resultados estadísticos del modelo de regresión lineal para evaluar la relación entre la tasa de reclutamiento coralino y los cambios en la temperatura de la superficie del mar a lo largo del estudio mostraron que en el sitio *expuesto* no hubo una relación significativa entre la TSM y la tasa de reclutamiento ($p = 0.72$) (Tabla 6). Del mismo modo, en el sitio *protegido*, no existe una relación significativa entre la TSM y la tasa de reclutamiento ($p = 0.93$) (Tabla 7). En ambos casos, los valores obtenidos de R^2 para cada variable dependiente, sugieren que el modelo sólo está explicando una proporción muy baja de la variación en la variable dependiente. La ecuación de cada gráfico se observa en la figura 10.

Tabla 6. Resultados del modelo de regresión lineal para estimar la relación entre el promedio (\pm DE) de las Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) (26.3 ± 3.4 , 16.3 ± 1.3 y $20.5 \pm 2.9^\circ\text{C}$) y la tasa de reclutamiento coralino en el *sitio expuesto* en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. N (tamaño muestral), t (valor estadístico de la prueba t), gl (grados de libertad) y R^2 (estimación muestral del coeficiente de determinación).

Variables	N	t	gl	R^2	valor de p
Tasa de reclutamiento	3	0.46	1	0.176	0.72

Tabla 7. Resultados del modelo de regresión lineal para estimar la relación entre el promedio (\pm DE) de las Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) (26.3 ± 3.4 , 16.3 ± 1.3 y $20.5 \pm 2.9^\circ\text{C}$) y el éxito del reclutamiento coralino en el *sitio protegido* en bahía de Los Ángeles, Baja California, México. N (tamaño muestral), t (valor estadístico de la prueba t), gl (grados de libertad) y R^2 (estimación muestral del coeficiente de determinación).

Variables	N	t	gl	R^2	valor de p
Tasa de reclutamiento	3	0.11	1	0.012	0.93

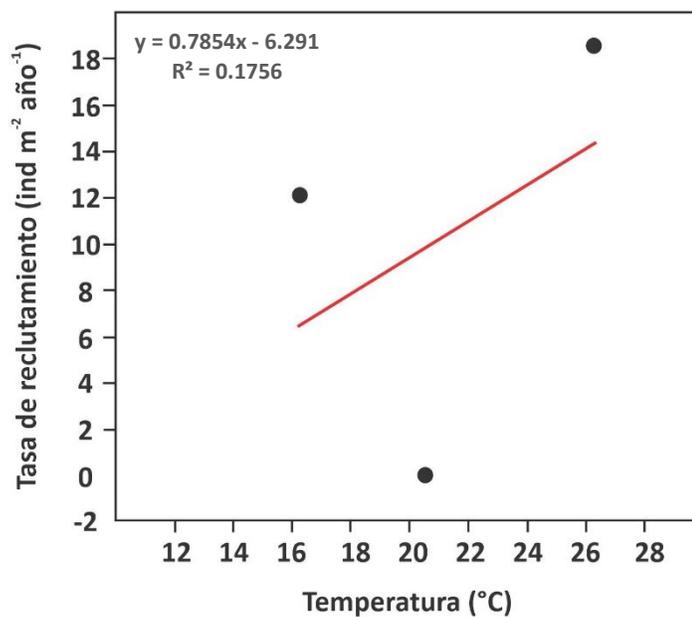
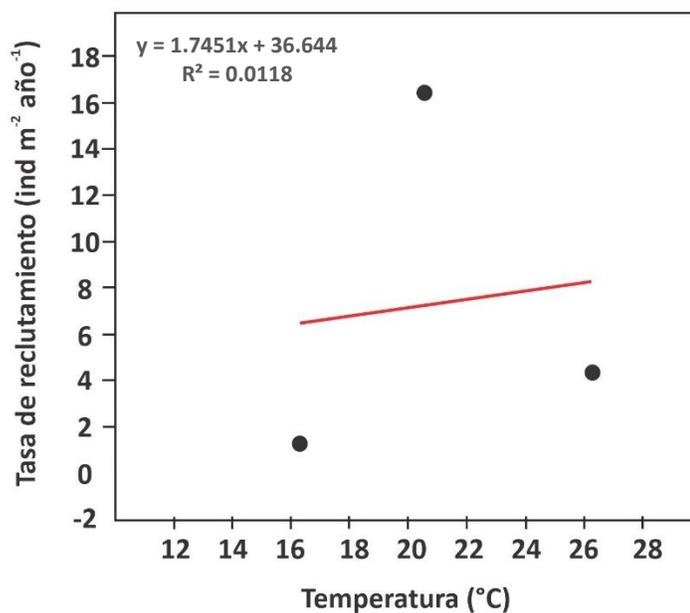
A**B**

Figura 10. Modelo de regresión lineal realizado para estimar la respuesta de la variable dependiente [tasa de reclutamiento (ind $m^{-2} \text{ año}^{-1}$)] ante el cambio de la variable independiente [Temperatura de la Superficie del Mar ($^{\circ}C$)] en ambos sitio de estudio. A) Sitio *expuesto* y B) Sitio *protegido*.

3.3. Talla de colonias adultas

Comparando el promedio de las tallas registradas de las 32 colonias elegidas al azar en ambos sitios de estudio, se observa que el diámetro máximo (39.0 ± 10.6 cm), el diámetro mínimo (27.5 ± 10.0 cm), la altura (12.7 ± 6.2 cm) y la rugosidad (2.3 ± 0.7) son mayores en el sitio *protegido* lo cual sugiere que en este sitio los corales adultos son más grandes y que la complejidad del fondo es mayor respecto al sitio *expuesto* (Tabla 8). No obstante, los resultados de las pruebas estadísticas (*t* de student y Kruskal-Wallis) revelaron que las diferencias en el promedio de las tallas de las colonias adultas entre ambos sitios de estudio no fueron significativas para ningún parámetro (Tabla 9).

Tabla 8. Promedio (\pm DE) de tallas (cm) registradas de 32 colonias elegidas al azar en los sitios estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Sitio	Número de colonias	Diámetro máximo	Diámetro mínimo	Altura	Rugosidad
<i>Expuesto</i>	15	32.1 ± 8.8	21.5 ± 6.3	10.5 ± 5.9	2.1 ± 0.7
<i>Protegido</i>	17	39.0 ± 10.6	27.5 ± 10.0	12.7 ± 6.2	2.3 ± 0.7
Total	32	35.8 ± 10.2	24.7 ± 8.9	11.7 ± 6.1	2.2 ± 0.7

Tabla 9. Resultados de la prueba estadística *t* de Student realizada para comparar las tallas de 32 corales adultos elegidos al azar en ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Talla	<i>t</i> de Student	<i>gl</i>	valor de <i>p</i>
Diámetro máximo	-2.0042	30	0.05
Diámetro mínimo	-1.978	30	0.06
Altura	-1.0095	30	0.32
Rugosidad	-0.8274	30	0.42

3.4. Cobertura de colonias adultas

La cobertura de coral vivo registrada durante el muestreo representó el 21.8% del total del área evaluada, dicha cobertura está dada por la especie *Porites panamensis*. En el sitio *protegido* el promedio (\pm DE) del

porcentaje de la cobertura de coral vivo ocupó el $33.5 \pm 9.2\%$ del área, en cambio, en el sitio *expuesto*, donde se presentó la menor tasa de reclutamiento (Tabla 10), el promedio (\pm DE) de la cobertura de coral vivo fue de $10.0 \pm 1.7\%$. El análisis estadístico (*t* de Student) realizado para comparar la cobertura coralina mostró diferencias significativas entre ambos sitios de estudio ($p = 0.04$) presentándose, en el sitio *protegido*, el mayor porcentaje de cobertura de coral vivo (Tabla 11).

Tabla 10. Promedio (\pm DE) de cobertura de coral vivo (%) y tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{año}^{-1}$) en ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Sitio	Especie	Cobertura (%)	Tasa de reclutamiento ($\text{ind m}^{-2} \text{año}^{-1}$)
<i>Expuesto</i>	<i>Porites panamensis</i>	10.0 ± 1.7	10.2 ± 32.5
<i>Protegido</i>	<i>Porites panamensis</i>	33.5 ± 9.2	73.3 ± 163.6
Total	<i>Porites panamensis</i>	21.8 ± 8.3	0.1 ± 0.3

Tabla 11. Resultados de la prueba estadística *t* de Student realizada para comparar el promedio de la cobertura de coral vivo (%) de ambos sitios de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Sitios	<i>t</i>	<i>gl</i>	valor de <i>p</i>
<i>Expuesto: Protegido</i>	-11.32	1	0.04*

*valor significativos $p < 0.05$

Capítulo 4. Discusión

4. 1 Reclutamiento coralino

En este trabajo se encontraron 98 reclutas coralinos (>2 mm), todos pertenecientes a la especie *Porites panamensis*, que es la especie de coral zooxantelado más abundante en la zona de estudio (~90% de las colonias de coral) (Halfar *et al.*, 2005; Reyes-Bonilla *et al.*, 2008) y sobre la cual hay reportes de diversos autores en estudios realizados en el Pacífico mexicano (Medina-Rosas *et al.*, 2005; López-Pérez *et al.*, 2007; Santiago-Valentín *et al.*; 2018; Cabral-Tena *et al.*, 2018; López-Pérez y Solís-García, 2019; Tejada-Begazo, 2020) (Tabla 12).

La abundancia de reclutas de *P. panamensis* en la zona de estudio puede ser consecuencia de su estrategia reproductiva ya que al ser un coral incubador gonocórico, sus larvas son más grandes, presentan zooxantelas transmitidas de la colonia madre y reservas de energía, lo cual les confiere una ventaja para la supervivencia y por lo tanto puede contribuir al éxito en el reclutamiento a nivel local (Fadlallah, 1983; Santiago-Valentín *et al.*, 2018). En este contexto, Santiago-Valentín *et al.* (2018), han descrito a *Porites panamensis* como una especie vulnerable a condiciones ambientales locales no favorables (por ejemplo, baja temperatura y alta cantidad de nutrientes) debido a su limitada capacidad de dispersión a larga distancia y a su baja diversidad genética. En contraste, es considerada como una especie resistente a factores ambientales estresantes (baja temperatura y variaciones en la cantidad de nutrientes por las constantes surgencias) debido a su gran plasticidad morfológica y fisiológica que le permite sobrevivir en ambientes no óptimos como los encontrados en bahía de Los Ángeles (Cabral-Tena *et al.*, 2013).

El promedio global de la tasa de reclutamiento coralino registrada en este trabajo fue de 41.8 ± 121.5 ind m^{-2} año⁻¹ siendo la segunda tasa más alta reportada a lo largo del Pacífico mexicano para *P. panamensis*. Esto puede ser resultado de la dominancia de *P. panamensis* en bahía de Los Ángeles, contrario a lo que ocurre en otras zonas del Pacífico mexicano donde existe competencia con otras especies de coral para las cuales se ha reportado un mayor éxito de reclutamiento (López-Pérez y Solís-García, 2019). Al no haber competencia con otras especies de coral en la zona de estudio, el éxito en el reclutamiento de *P. panamensis* es mucho más alto (Tabla 12). Asimismo, *P. panamensis* produce gametos a lo largo de todo el año, lo cual le confiere la capacidad de colonizar cuando haya condiciones favorables, pero es un débil competidor con respecto a otras especies de coral por su baja tasa de crecimiento y supervivencia (Cabral-Tena *et al.*, 2013, 2018; Santiago-Valentín *et al.*, 2018; López-Pérez y Solís-García, 2019). La estrategia de

vida de *P. panamensis* y su capacidad de colonizar, son características que están relacionadas con la estrategia “Bet-Hedging”, en este caso, los organismos que viven en un entorno variable presentan una disminución en su aptitud en condiciones típicas a cambio de una mayor aptitud en condiciones estresantes (Levin, 2013), como es el caso de *P. panamensis* quien es un débil competidor pero un buen colonizador.

Bahía de Los Ángeles es una región que se encuentra en el límite de distribución de las comunidades coralinas y es considerada como un sitio con condiciones ambientales subóptimas para el desarrollo de estas comunidades (Halfar *et al.*, 2005). Se ha propuesto que las comunidades coralinas de latitudes altas (>25°) podrían funcionar como un refugio ante el cambio climático para las especies vulnerables de ambientes tropicales (Beger *et al.*, 2014), ya que pueden ser más resistentes en comparación con el resto de las comunidades debido a que ya viven en condiciones estresantes (Reyes-Bonilla, 2001; Halfar *et al.*, 2005; Harrison, 2011). Price *et al.*, (2019) reportan disminuciones en el reclutamiento coralino a escala global (82% de 1974 a 2012) y, en particular, una reducción del 85% en los trópicos (<20° de latitud) y un aumento del 78% en los subtrópicos (>20° de latitud). Los datos de Price *et al.* (2019) junto con los valores reportados en este trabajo y los reportados por Tejada-Begazo (2020) sugieren que, al haber una reducción de las densidades de los reclutas coralinos en los trópicos y un aumento en los subtrópicos, los corales podrían estar desplazándose hacia altas altitudes (>25°) resultado de adaptaciones a condiciones subóptimas (Price *et al.*, 2019; Tejada-Begazo, 2020).

Tabla 12. Tasas de reclutamiento coralino registradas en el Pacífico mexicano.

Autores	Sitio	Tasa de reclutamiento (ind m⁻² año⁻¹)	Especie
Medina-Rosas <i>et al.</i> (2005)	Bahía Banderas	2.87	<i>Porites panamensis</i>
López-Pérez <i>et al.</i> (2007)	Huatulco	20.4	<i>Porites panamensis</i> y <i>Pocillopora</i> sp.
Santiago-Valentín <i>et al.</i> (2018)	Bahía Banderas	7.61	<i>Porites panamensis</i>
Cabral-Tena <i>et al.</i> (2018)	Bahía La Paz	6.54	<i>Porites</i> sp.
		0.39	<i>Pocillopora</i> sp.
		0.19	<i>Psammocora</i> sp.
		0.06	<i>Pavona</i> sp.
		0.06	<i>Tubastrea</i> sp.
	Bahía Loreto	0.77	<i>Porites</i> sp.
		0.19	<i>Psammocora</i> sp.
López-Pérez y Solís-García (2019)	Huatulco	2.63	<i>Porites panamensis</i>
Tejada-Begazo (2020)	Bahía de Los Ángeles	66.25	<i>Porites panamensis</i>
Este trabajo	Bahía de Los Ángeles	41.73	<i>Porites panamensis</i>

4.1.1 Análisis temporal del reclutamiento coralino

Durante el periodo marzo-junio se registró la mayor tasa de reclutamiento coralino ($82.30 \pm 194.08 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). En cambio, la menor tasa de reclutamiento coralino ($12.12 \pm 23.67 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se registró durante el periodo diciembre-marzo. Autores como Medina-Rosas *et al.* (2005), López-Pérez *et al.* (2007), Cabral-Tena *et al.* (2018) y Santiago-Valentín *et al.* (2018) han reportado que el pico máximo de reproducción de los corales coincide con el pico anual de la TSM. Sin embargo, aunque *Porites panamensis* presenta su actividad reproductiva máxima durante las temporadas cálidas, se sabe que tiene la capacidad de reproducirse a lo largo del año (Cabral-Tena *et al.*, 2013, 2018; Santiago-Valentín *et al.*, 2018; López-Pérez y Solís-García, 2019), lo cual es consistente con que se observaran nuevas cohortes de reclutas en cada una de las temporadas de este estudio. Sin embargo, el análisis de regresión lineal no mostró una relación significativa entre la TSM y la tasa de reclutamiento en ningún sitio, lo cual puede ser resultado del número de registros ($N = 3$).

En septiembre-diciembre el promedio de la TSM ($26.3 \pm 3.4^\circ\text{C}$) fue mayor en comparación con los otros muestreos. No obstante, durante este primer periodo de registro, la tasa de reclutamiento coralino ($30.86 \pm 65.85 \text{ ind m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) estuvo por debajo de la tasa máxima registrada en este trabajo, lo cual pudo ser consecuencia del tiempo de aclimatación que se requiere para el asentamiento larval; durante este tiempo se desarrolla una comunidad incrustante sobre el sustrato artificial, la cual favorece y optimiza el asentamiento y reclutamiento coralino (López-Pérez *et al.*, 2007; Segal *et al.*, 2012).

Se sabe que el periodo adecuado de aclimatación de los sustratos artificiales puede variar de un lugar a otro y, en muchos casos, es desconocido (Segal *et al.*, 2012; Muñoz *et al.*, 2018). Gilmour (1999) menciona que el periodo de aclimatación puede ser de una semana, mientras que Mundy y Babcock (1998) sugieren un periodo de tres semanas, en cambio, otros estudios sugieren un periodo de dos meses y medio (Segal *et al.*, 2012), tres meses (Petersen *et al.*, 2005) e incluso de 5 a 10 meses (López-Pérez *et al.*, 2007) antes de que ocurra el asentamiento coralino. Los resultados de Segal *et al.*, (2012) sugieren que el tiempo mínimo de acondicionamiento que deben de tener las placas de asentamiento debe de ser mayor a 10 semanas en condiciones de campo, lo cual es consistente con los resultados de este trabajo.

4.1.2 Análisis espacial del reclutamiento coralino

La tasa de reclutamiento en el sitio *protegido* (73.31 ± 163.59 ind m^{-2} año $^{-1}$) fue mayor en comparación con la tasa registrada en el sitio *expuesto* (10.21 ± 32.49 ind m^{-2} año $^{-1}$). La diferencia en la tasa de reclutamiento entre sitios podría estar relacionada con la abundancia de las colonias adultas (% cobertura) y la supervivencia de los reclutas presente en cada uno de ellos y esto a su vez, relacionado con las condiciones presentes en el sitio *protegido* (más adecuadas respecto al sitio *expuesto*) que pueden propiciar una mayor tasa de reclutamiento. La abundancia de adultos fue mayor en el sitio *protegido* (33.5 ± 9.19 %) que en el sitio *expuesto* (10 ± 1.71 %); esto coincide con el trabajo realizado por Chiappone y Sullivan (1996), quienes encontraron que la abundancia de las colonias adultas está relacionada con la densidad de los reclutas en las comunidades coralinas. Del mismo modo, la diferencia en la tasa de reclutamiento coralino registrada entre sitios pudo deberse a las corrientes marinas provocadas por el viento. Dado que bahía de Los Ángeles (BLA) es una región que tiene una comunicación muy amplia con el canal de Ballenas, los vientos dominantes favorecen corrientes a lo largo de la bahía, lo cual contribuye al intercambio de las aguas con el exterior (Amador *et al.*, 1991). El sitio *expuesto* se ubica en la costa oeste de la isla Llave y se encuentra sujeto a las corrientes inducidas por el viento dentro de la bahía, en cambio, el sitio *protegido* se encuentra en la costa este de isla Llave y este está resguardado de dichas corrientes por estar ubicado entre isla Ventana e isla Cerraja (Figura 2). Amador *et al.* (1991) describen al área que se encuentra rodeada por las islas Ventana, Cerraja y Llave como una de las zonas donde se presentan corrientes de baja magnitud cuyos parámetros hidrológicos y biológicos difieren con el resto de la bahía. Es decir, la baja magnitud de las corrientes en esta zona podría estar provocando una mayor estancia de las larvas de coral en el sitio *protegido* (contrario al sitio *expuesto*, el cual se encuentra fuera del área entre las islas) lo que estaría favoreciendo el reclutamiento local, esto coincide con López-Pérez *et al.* (2007) quienes mencionan que el comportamiento de las larvas está estrechamente relacionado con los procesos locales del movimiento del agua que facilitan la retención de las larvas en los arrecifes nativos.

4.2 Supervivencia de reclutas

La supervivencia de los reclutas de *P. panamensis* varió del 100 al 40.5% desde el día 0 hasta el día 202 del experimento. Sin embargo, la supervivencia al final del estudio fue del 0%. Los resultados de varios autores han coincidido en que la supervivencia es baja en la etapa siguiente al asentamiento debida, principalmente, a su talla pequeña y a las bajas tasas de crecimiento coralino. Sin embargo, la baja

supervivencia también puede estar relacionada con factores como la intensidad de luz, disponibilidad de nutrientes, profundidad y sedimentación, que limitan la supervivencia de los reclutas coralinos (Vermeij *et al.*, 2007; Segal *et al.*, 2012). Del mismo modo, la disminución de la supervivencia a lo largo del tiempo, observada en este estudio, puede estar relacionada con la presencia de otros organismos con quienes compiten por el sustrato, por ejemplo, las macroalgas, las cuales presentan tasas de crecimiento mayores a las de los corales (Corado-Nava, 2014; Carvalho y Villaça, 2021). Esto coincide con lo propuesto por Yu y Wilson (2001), quienes demostraron que especies colonizadoras con una tasa reproductiva alta como *P. panamensis* resultan ser competidores débiles a largo plazo debido a su baja tasa de crecimiento y supervivencia.

La selección del sustrato es otro factor que puede influir en la supervivencia, por ejemplo, los resultados de Doropoulos *et al.* (2016), indican que los reclutas presentaron una mayor supervivencia en sustrato donde hubo un crecimiento previo de otros grupos de organismos facilitadores como las algas coralinas costrosas y las bacterias, quienes producen señales químicas que estimulan el asentamiento y la supervivencia coralina (Harrington *et al.*, 2004; Nystrom *et al.*, 2008). Asimismo, los estudios de Humanes y Bastidas (2015) sugieren que la supervivencia post-reclutamiento de los corales es mayor en arrecifes con una gran cantidad de cobertura coralina, lo cual coincide con Chiappone y Sullivan (1996), quienes encontraron que la abundancia de las colonias adultas está relacionada con la presencia de los reclutas en las comunidades coralinas.

Respecto a la hipótesis propuesta sobre el aumento de la supervivencia conforme aumenta la talla de los reclutas, no se pudo observar dicha relación debido a que en el día 202 del experimento la supervivencia fue de 0%. Sin embargo, se observó un aumento en el promedio del diámetro del día 98 (2.5 ± 0.5 mm) al día 202 (5.2 ± 0.5 mm), después de esto no se pudo comprobar la hipótesis.

En México no existen investigaciones comparables en donde se considere la supervivencia post-reclutamiento en zonas de alta latitud ($>25^\circ$). Sin embargo, es posible hacer una comparación considerando el estudio realizado por López-Pérez y Solís-García (2019) en comunidades de ambientes tropicales ($<25^\circ$). En dicha investigación los autores reportaron una mortalidad para *P. panamensis* de entre el 20 y 100% durante los primeros 50 días después del asentamiento, tras lo cual la supervivencia se mantuvo entre el 20% y 45% con el aumento del diámetro de los reclutas, contrario a lo observado en este trabajo. Asimismo, el estudio sobre la supervivencia en comunidades de altas latitudes sugiere que los procesos inmediatos al asentamiento son clave para el mantenimiento y recuperación de las comunidades,

procesos que en muchas ocasiones pueden pasar desapercibidos y por lo tanto pueden generar interpretaciones erróneas sobre la dinámica poblacional (Martínez y Abelson, 2013).

Este trabajo contribuye a ampliar el conocimiento sobre la patrón actual del reclutamiento coralino en el norte del Pacífico mexicano y establece una línea base sobre la supervivencia post-reclutamiento en comunidades de altas latitudes. El análisis representa un punto de partida importante para futuros trabajos y para un monitoreo permanente sobre la evaluación de la supervivencia de los reclutas a lo largo de varios años que permita establecer el potencial que poseen las comunidades locales para su crecimiento a futuro. Finalmente, se recomienda extender el área donde sea colocado el sustrato artificial con el objeto de proporcionar mayor variedad de hábitats ya que el asentamiento puede ser inducido por diversas señales como la luz, la sedimentación, el flujo del agua y las señales químicas provenientes de otros organismos, las cuales pueden optimizar el reclutamiento (Mundy y Babcock, 1998). Asimismo, se recomienda aumentar el esfuerzo de muestreo, esto es, aumentar el número de placas de asentamiento, reducir los tiempos de registro y considerar un periodo de acondicionamiento para el sustrato artificial previo al inicio del experimento.

Capítulo 5. Conclusiones

- El promedio de la tasa de reclutamiento fue de 41.76 ± 121.49 ind m⁻² año⁻¹ siendo la segunda tasa de reclutamiento de *Porites panamensis* más alta reportada para el Pacífico mexicano y, en comparación con Tejada-Begazo (2020), la segunda tasa de reclutamiento reportada en bahía de Los Ángeles.
- El sitio *protegido* fue aquel que presentó la mayor tasa de reclutamiento (73.31 ± 163.59 ind m⁻² año⁻¹), el mayor porcentaje de cobertura coralina (33.5 ± 9.19 %) y, un tercer y más grande cohorte de reclutas (80 reclutas) en marzo-junio.
- En marzo-junio se registró la mayor tasa de reclutamiento cuando la temperatura promedio fue de 20.5 ± 2.9 °C, dicha tasa es registrada únicamente para el sitio *protegido*. Para ambos sitios, la menor tasa de reclutamiento se encontró en diciembre-marzo cuando el promedio de la temperatura fue de 16.3 ± 1.3 °C.
- La tasa de reclutamiento no presentó una relación significativa con la temperatura de la superficie del mar (TSM), consecuencia del número bajo de registros (N = 3).
- La tasa de supervivencia varió de 100 a 40.5% desde el día 0 hasta el día 202 del experimento. Al final del estudio (día 294) la supervivencia fue del 0%.
- El presente estudio representa el segundo registro sobre el reclutamiento coralino en bahía de Los Ángeles y el primero en México en reportar tasas de supervivencia coralina post-reclutamiento en comunidades presentes en el límite norte de su distribución con condiciones ambientales subóptimas.

Literatura citada

- Álvarez-Borrego, S. 2008. Oceanografía de la región de las grandes islas. En: Danemann, G. D. y Ezcurra, E. (Eds.), Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y comunidad. Pronatura Noroeste AC, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y San Diego Natural History Museum, México (pp. 45 - 65).
- Álvarez-Borrego, S. 2010. Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. *The Gulf of California: Biodiversity and Conservation*, August, 400.
- Amador, A., Serrano, S. y Argote, M. (1991). Modelado numérico de la circulación inducida por el viento en bahía de Los Ángeles, BC, México. *Ciencias Marinas*, 17(3), 39–57. <https://doi.org/10.7773/cm.v17i3.822>
- Arnold, S. N., Steneck, R. S., Mumby, P. J. 2010. Running the gauntlet: Inhibitory effects of algal turfs on the processes of coral recruitment. *Marine Ecology Progress Series*, 414(August), 91–105. doi:10.3354/meps08724
- Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente, AIDA. 2014. La Protección de los Arrecifes de Coral en México: Rescatando la biodiversidad marina y sus beneficios para la humanidad. Consultado el 8 de julio de 2020, de: https://aida-americas.org/sites/default/files/featured_pubs/informe_corales_mexico.pdf
- Ayala-Bocos, A., Reyes-Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. E., Herrero-Perezrul, M. D., & González-Espinosa, P. C. (2015). Proyección de cambios en la temperatura superficial del mar del Golfo de California y efectos sobre la abundancia y distribución de especies arrecifales. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 8(1). <https://doi.org/10.15359/revmar.8-1.2>
- Bádenas, B., Aurell, M. 1999. Coral reefs and carbon dioxide concentration: an example on the teaching of climatic change. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 7, 21–28.
- Beger, M., Sommer, B., Harrison, P. L., Smith, S. D. A., Pandolfi, J. M. 2014. Conserving potential coral reef refuges at high latitudes. *Diversity and Distributions*, 20(3), 245–257. doi:10.1111/ddi.12140
- Bernal, G., Ripa, P., & Herguera, J. C. (2001). Variabilidad Oceanográfica y Climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas*, 27(4), 595–617. <https://doi.org/10.7773/cm.v27i4.498>
- Cabral-Tena, R. A., Paz-García, D. A., Reyes-Bonilla, H., González-Peláez, S. S., Balart, E. F. 2018. Spatiotemporal Variability in Coral (Anthozoa: Scleractinia) Larval Recruitment in the Southern Gulf of California. *Pacific Science*, 72(4), 435–447. doi:10.2984/72.4.4
- Cabral-Tena, R. A., Reyes-Bonilla, H., Lluch-Cota, S., Paz-García, D. A., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, O., & Balart, E. F. 2013. Different calcification rates in males and females of the coral *Porites panamensis* in the Gulf of California. *Marine Ecology Progress Series*, 476(May), 1–8. <https://doi.org/10.3354/meps10269>

- Carpizo-Ituarte, E., Vizcaíno-Ochoa, V., Chi-Barragán, G., Tapia-Vázquez, O., Cupul-Magaña, A. L., Medina-Rosas, P. 2011. Evidencia de reproducción sexual en los corales hermatípicos *Pocillopora damicornis*, *Porites panamensis* y *Pavona gigantea* en Bahía de Banderas, Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*, 37(1), 97–112. doi:10.7773/cm.v37i1.1773
- Carvalho, L. L. D. E., Villaça, R. C. 2021. Effect of fine-scale habitat differences on algal colonisation in a coral-dominated subtropical reef. 93, 1–21. doi:10.1590/0001-3765202120191191
- Castro, R., Mascarenhas, A., Durazo, R. y Collins, C. (2000). Seasonal Variation of the Temperature and Salinity at the Entrance of the Gulf of California, Mexico. October, 26, 561–583.
- Cavazos, T. 2008. Clima. En: Danemann, G. D. y Ezcurra, E. (Eds.), Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y comunidad. Pronatura Noroeste AC, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y San Diego Natural History Museum, México (pp. 67 - 90).
- Chávez-Romo, H. E., Paz-García, D. A., Correa-Sandoval, F., Reyes-Bonilla, H., López-Pérez, R. A., Medina-Rosas, P. 2013. Diferencia en las estrategias reproductivas de dos corales escleractinios (ramificado vs masivo) a lo largo de la costa occidental de México. *Ciencias Marinas*, 39(4), 387–400. doi:10.7773/cm.v39i4.2272
- Chiappone, M., Sullivan, K. M. 1996. Distribution, abundance and species composition of juvenile scleractinian corals in the Florida reef tract. *Bulletin of Marine Science*, 58(2), 555–569.
- Corado – Nava, N. A. 2015. Corales escleractínios – ensambles algales en Las Gatas, Zihuatanejo, Guerrero, México: ¿Una interacción de competencia? Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, México, CDMX. 118 p.
- Corado-Nava, N. A., Rodríguez, D., Rivas, G. 2014. Efecto de la colonización de los céspedes algales en el crecimiento de *Pocillopora capitata* (Anthozoa: Scleractinia) en el Pacífico tropical mexicano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(4), 1086–1092. doi:10.7550/rmb.43323
- 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., Rodriguez, 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. doi:10.1016/j.ecoser.2012.07.005
- Doropoulos, C., Roff, G., Bozec, Y. M., Zupan, M., Werninghausen, J., Mumby, P. J. 2016. Characterizing the ecological trade-offs throughout the early ontogeny of coral recruitment. *Ecological Monographs*, 86(1), 20–44. doi:10.1890/15-0668.1
- Escalante, F., Valdez-Holguín, J. E., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R. 2013. Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila a y productividad primaria en el golfo de California. *Ciencias Marinas*, 39(2), 203–215. doi:10.7773/cm.v39i2.2233
- Fadlallah, Y. H. 1983. Sexual reproduction, development, and larval biology in scleractinian corals. *Coral reefs*, 2(3), 129-150.

- Fung, T., Seymour, R. M., Johnson, C. R. 2011. Alternative stable states and phase shifts in coral reefs under anthropogenic stress. *Ecology*, 92(4), 967–982. doi:10.1890/10-0378.1
- Gilmour, J. 1999. Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilisation, larval survival and settlement in a scleractinian coral. *Marine Biology*, 135(3), 451–462. doi:10.1007/s002270050645
- Halfar, J., Godinez-Orta, L., Riegl, B., Valdez-Holguin, J. E., Borges, J. M. 2005. Living on the edge: High-latitude *Porites* carbonate production under temperate eutrophic conditions. *Coral Reefs*, 24(4), 582–592. doi:10.1007/s00338-005-0029-x
- Harrington, L., Fabricius, K., De’Ath, G., & Negri, A. (2004). Recognition and selection of settlement substrata determine post-settlement survival in corals. *Ecology*, 85(12), 3428–3437. <https://doi.org/10.1890/04-0298>
- Harrison, P. L. 2011. Sexual reproduction of scleractinian corals. *Coral reefs: an ecosystem in transition* (pp. 59-85).
- Harrison, P. L., & Wallace, C. (1990). Reproduction, dispersal, and recruitment of scleractinian corals *Ecosystems of the world. 25: Coral Reefs. Ecosystems of the World 25: Coral Reefs*, July, 133–207. https://www.researchgate.net/publication/284044067_Reproduction_dispersal_and_recruitment_of_scleractinian_corals_Ecosystems_of_the_world_25_Coral_Reefs
- Highsmith, R. 1982. Reproduction by Fragmentation in Corals. *Marine Ecology Progress Series*, 7(4), 207–226. doi:10.3354/meps007207
- Humanes, A., Bastidas, C. 2015. In situ settlement rates and early survivorship of hard corals: A good year for a Caribbean reef. *Marine Ecology Progress Series*, 539, 139–151. doi:10.3354/meps11501
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Baja California. México. Consultado el 8 de julio de 2020, de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094874.pdf
- knowledge to ex situ production. *Reviews in Aquaculture*, 8(2), 136–153. doi:10.1111/raq.12087
- Leal, M. C., Ferrier-Pagès, C., Petersen, D., Osinga, R. 2016. Coral aquaculture: Applying scientific
- Levin, S. A. (Ed.) 2013. *Encyclopedia of Biodiversity*. Elsevier; 2da ed. Consultado el 18 de octubre de 2021, de: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123847201/encyclopedia-of-biodiversity>
- López, M., Candela, J., Argote, M. L. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in th Gulf of California? *Geophysical Research Letters*, 33(11), 1–5. doi:10.1029/2006GL025908
- López-Pérez, A., Cupul-Magaña, A., Ahumada-Sempoal, M. A., Medina-Rosas, P., Reyes-Bonilla, H., Herrero-Pérezrul, M. D., Reyes-Hernández, C., Lara-Hernández, J. 2015. The coral communities of the

Islas Marias archipelago, Mexico: structure and biogeographic relevance to the Eastern Pacific. *Marine Ecology*, 37(3), 679–690. doi:10.1111/maec.12337

López-Pérez, A., Solís-García, Y. 2019. Coral Settlement and Post-Settlement Mortality on Artificial Substrata in South Mexican Pacific Reefs. *Pacific Science*, 73(4), 451. doi:10.2984/73.4.2

López-Pérez, R. A., Budd, A. F., Correa-sandoval, F., Mar, U. 2003. The taxonomic status of *Porites sverdrupi*, an endemic coral of the Gulf of California Posición taxonómica de *Porites sverdrupi*, coral endémico del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 29(4B), 677–691.

López-Pérez, R. A., Mora-Pérez, M. G., Leyte-Morales, G. E. 2007. Coral (Anthozoa: Scleractinia) Recruitment at Bahías de Huatulco, Western México: Implications for Coral Community Structure and Dynamics 1. *Pacific Science*, 61(3), 355–369. doi:10.2984/1534-6188(2007)61[355:casrab]2.0.co;2

Martinez, S., Abelson, A. 2013. Coral recruitment: The critical role of early post-settlement survival. *ICES Journal of Marine Science*, 70(7), 1294–1298. doi:10.1093/icesjms/fst035

Medina-Rosas, P., Carriquiry, J. D., Cupul-Magaña, A. L. 2005. Reclutamiento de *Porites* (Scleractinia) sobre sustrato artificial en arrecifes afectados por El Niño 1997-98 en Bahía de Banderas, Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*, 31(1 A), 103–109. doi:10.7773/cm.v31i1.75

Moberg, F., Folke, C. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. In *Ecological Economics* (Vol. 29).

Mora-Pérez. 2005. Biología reproductiva del coral *Porites panamensis* Verrill 1866 (Anthozoa:Scleractinia), en bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. 82 pp.

Mundy, C. N., Babcock, R. C. 1998. Role of light intensity and spectral quality in coral settlement: Implications for depth-dependent settlement? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 223(2), 235–255. doi:10.1016/S0022-0981(97)00167-6

Muñoz, C. G., Jaramillo-González, J., Zapata, F. A. 2018. Evidence of sexually-produced coral recruitment at Gorgona Island, Eastern Tropical Pacific. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 47(2), 97–110. doi:10.25268/bimc.invemar.2018.47.2.749

Nava, G. G., García, M., Román, M. A., Rangel, M. A., López, I. 2010. Restauración del coral Sistema Arrecifal Veracruzano. Instituto de Ecología, 8 p.

Nyström, M., Graham, N. A. J., Lokrantz, J., & Norström, A. V. 2008. Capturing the cornerstones of coral reef resilience: Linking theory to practice. *Coral Reefs*, 27(4), 795–809. <https://doi.org/10.1007/s00338-008-0426-z>

- Peregrín-Tovar, A. 2014. Bases para la estimación de la Capacidad de Carga Turística y propuestas para su implementación para la actividad de avistamiento de tiburón ballena (*Rhincodon typus*) en Bahía de los Ángeles, B.C. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 84 pp.
- Pérez-Cervantes, E., Estrada-Saldívar, N., Navarro-Espinoza, E., Espinosa-Andrade, N. 2017. Estado de conservación de los arrecifes de coral de la Península de Yucatán. GreenPeace, Merida, México. 24p.
- Petersen, D., Laterveer, M., Schuhmacher, H. 2005. Spatial and temporal variation in larval settlement of reefbuilding corals in mariculture. *Aquaculture*, 249(1–4), 317–327. doi:10.1016/j.aquaculture.2005.04.048
- Price, N. N., Muko, S., Legendre, L., Steneck, R., Van Oppen, M. J. H., Albright, R., Ang, P., Carpenter, R. C., Chui, A. P. Y., Fan, T. Y., Gates, R. D., Harii, S., Kitano, H., Kurihara, H., Mitarai, S., Padilla-Gamiño, J. L., Sakai, K., Suzuki, G., Edmunds, P. J. 2019. Global biogeography of coral recruitment: Tropical decline and subtropical increase. *Marine Ecology Progress Series*, 621, 1–17. doi:10.3354/meps12980
- Reyes - Bonilla, H. 2001. Effects of the 1997-1998 El Niño-southern oscillation on coral communities of the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 69(1), 251–266.
- Reyes - Bonilla, H., González - Romero, S., Cruz - Piñón, G. y Calderón - Aguilera, L. E. 2008. Corales pétreos. En: Danemann, G. D. y Ezcurra, E. (Eds.), Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y comunidad. Pronatura Noroeste AC, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y San Diego Natural History Museum, México (pp. 291 - 317).
- Reyes Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. 1994. Parámetros poblacionales de *Porites panamensis* (Anthozoa:Scleractinia), en el arrecife de Cabo Pulmo, México. *Revista de biología tropical*, 42(1), 121–128. doi:10.15517/rbt.v42i1-2.22467
- Reyes-Bonilla, H. 2002. Checklist of valid names and synonyms of stony corals (anthozoa: Scleractinia) from the eastern pacific. *Journal of Natural History*, 36(1), 1–13. doi:10.1080/713833841
- Richmond, R. H. 1981. Energetic considerations in the dispersal of *Pocillopora damicornis* (Linnaeus) planulae. *Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium*, 2(January 1981), 153–156. from http://www.reefbase.org/pacific/pub_A0000001727.aspx
- Rodríguez-Troncoso, A. P., Carpizo-Ituarte, E., Leyte-Morales, G. E., Chi-Barragán, G., Tapia-Vázquez, O. 2011. Sexual reproduction of three coral species from the Mexican South Pacific. *Marine Biology*, 158(12), 2673–2683. doi:10.1007/s00227-011-1765-9
- Roff, G. (2008). Corals on the move: Morphological and reproductive strategies of reef flat coralliths. *Coral Reefs*, 27(2), 343–344. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0344-5>
- Salih, A., Larkum, A., Cox, G., Kühl, M., Hoegh-Guldberg, O. 2000. Fluorescent pigments in corals are photoprotective. *Nature*, 408(6814), 850–853. doi:10.1038/35048564

- Santiago-Valentín, J. D., Colley, S. B., Glynn, P. W., Cupul-Magaña, A. L., López-Pérez, R. A., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Benítez-Villalobos, F., Bautista-Guerrero, E., Zavala-Casas, D. A., Rodríguez-Troncoso, A. P. 2018. Regional and species specific sexual reproductive patterns of three zooxanthellate scleractinian corals across the Eastern Tropical Pacific. *Marine Ecology*, 39(2), 1–14. doi:10.1111/maec.12497
- Santiago-Valentín, J. D., Rodríguez-Troncoso, A. P., Bautista-Guerrero, E., López-Pérez, A., Cupul-Magaña, A. L. 2019. Successful sexual reproduction of the scleractinian coral *Porites panamensis*: Evidence of planktonic larvae and recruitment. *Invertebrate Biology*, 138(1), 29–39. doi:10.1111/ivb.12235
- Santiago-Valentín, J. D., Rodríguez-Troncoso, A. P., Bautista-Guerrero, E., López-Pérez, A., Cupul-Magaña, A. L. 2020. Settlement ecology of scleractinian corals of the Northeastern Tropical Pacific. *Coral Reefs*, 39(1), 133–146. doi:10.1007/s00338-019-01872-y
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2014. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Zona Marina Bahía de Los Ángeles, Canales de Ballenas y de Salsipuedes. México. Consultado el 8 de julio de 2020, de: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/1_libro_pm.pdf
- Segal, B., Berenguer, V., Castro, C. B. 2012. Reclutamiento Experimental Del Coral Endémico De Brasil *Mussismilia Braziliensis* Y Acondicionamiento De Placas De Asentamiento. *Ciencias Marinas*, 38(1), 1–10. doi:10.7773/cm.v38i1A.1853
- Sneed, J. M., Sharp, K. H., Ritchie, K. B., Paul, V. J. 2014. The chemical cue tetrabromopyrrole from a biofilm bacterium induces settlement of multiple Caribbean corals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1786), 1–9. doi:10.1098/rspb.2013.3086
- Soria, G., Torre-Cosío, J., Munguía-Vega, A., Marinone, S. G., Lavín, M. F., Cinti, A., Moreno-Báez, M. 2014. Dynamic connectivity patterns from an insular marine protected area in the Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 129(November), 248–258. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.06.012
- Soto-Mardones, L., Marinone, S. G., Parés-Sierra, A. 1999. Time and spatial variability of sea surface temperature in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(1), 1–30. doi:10.7773/cm.v25i1.658
- Stranges, S., Cuervo-robayo, A. P., Nalini, H. 2019. Distribución potencial bajo escenarios del cambio climático de corales del género *Pocillopora* (Anthozoa : Scleractinia) en el Pacífico oriental tropical. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902696.
- Szmant, A. M. (1986). Reproductive ecology of Caribbean reef corals. *Coral Reefs*, 5(1), 43–53. <https://doi.org/10.1007/BF00302170>
- Tejada Begazo, C. L. 2020. Variación estacional del reclutamiento larval de corales (Anthozoa: Scleractinia) durante un ciclo anual en Bahía de los Ángeles, Golfo de California.

- Vermeij, M. J. A., Frade, P. R., Jacinto, R. I. R., Debrot, A. O., Bak, R. P. M. 2007. Effects of reproductive mode on habitat-related differences in the population structure of eight Caribbean coral species. *Marine Ecology Progress Series*, 351, 91–102. doi:10.3354/meps07085
- Veron, J. E. N. 2000. *Corals of the World*, 6(4), 593.
- Wilson, J. R., Harrison, P. L. 2003. Spawning patterns of scleractinian corals at the Solitary Islands - A high latitude coral community in eastern Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 260(September), 115–123. doi:10.3354/meps260115
- Yu, D. W., Wilson, H. B., Yu, D. W., Wilson, H. B. 2001. The competition-colonization Trade-off is dead; Long Live the Competition-Colonization Trade-off. *158*(1), 49–63.

Anexos

Anexo A

Tabla 13. Datos de la temperatura de la superficie del mar (TSM) obtenidos del satélite MODIS-Aqua por mes (de septiembre de 2020 a junio de 2021) con una resolución espacial de 4 km. Los datos fueron tomados para el área de estudio en bahía de Los Ángeles, Baja California, México.

Mes	TSM (°C)
septiembre	28.9
octubre	27.4
noviembre	22.4
diciembre	18.1
enero	15.9
febrero	15.5
marzo	15.5
abril	18.2
mayo	19.6
junio	23.8

Anexo B.

Para estimar la rugosidad de cada colonia y con ello estimar la complejidad del fondo marino, se dividió el contorno (cm) de cada colonia de coral entre el diámetro mínimo (cm) de la misma colonia. Posteriormente se calculó la rugosidad promedio y la desviación estándar de las 32 colonias elegidas al azar.

$$R = \frac{\textit{contorno de la colonia } i \textit{ (cm)}}{\textit{diámetro mínimo de la colonia } i \textit{ (cm)}} \quad (3)$$

Valores de 1 representan una superficie plana, en cambio, valores mayores a 1 representan comunidades rugosas o comunidades más complejas morfológicamente, entre mayor sea el valor, mayor es la complejidad del fondo marino. El resultado de la división es un número sin unidades ya que estas se cancelan cuando se dividen por sí mismas, en este caso cm/cm.

Anexo C.

Tabla 14. Categorías utilizadas en el método de transecto punto intercepto (PIT por sus siglas en inglés) para registrar lo encontrado en el fondo. En negritas lo encontrado en este estudio.

Abreviatura	Categoría	Abreviatura	Categoría
Pdam	<i>Pocillopora damicornis</i>	Acaf	Alga Café
Pver	<i>Pocillopora verrucosa</i>	Acin	Alga coralina incrustante
Pmea	<i>Pocillopora meandrina</i>	Aver	Alga verde
Pele	<i>Pocillopora elegans</i>	Acar	Alga carnosa
Pcap	<i>Pocillopora capitata</i>	Tape	Tapete algal
Peyd	<i>Pocillopora eydouxi</i>	Caul	<i>Caulerpa</i> sp
Pinf	<i>Pocillopora inflata</i>	Dict	<i>Dictyota</i> sp
Ppan	<i>Porites panamensis</i>	Padi	<i>Padina</i> sp
Pvar	<i>Pavona varians</i>	Muri	<i>Muricea</i> sp
Pgig	<i>Pavona gigantea</i>	Eugo	<i>Eugorgia</i> sp
Pcla	<i>Pavona clavus</i>	Lepto	<i>Leptogorgia</i> sp
Pste	<i>Psammocora stellata</i>	Tuni	Tunicados
Aren	Arena	Espo	Esponja
Grav	Gravilla	Sarga	Sargazo
Bloq	Bloque	Paci	Pacifigorgia
Roca	Roca	Pedazos	Concha, coral, etc.