



Universidad
Católica de
Valencia
San Vicente Mártir

TFG

TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN
CIENCIAS DEL MAR**

Cultivo “ex situ” para la restauración de arrecifes de coral del género *Pocillopora* (Bahía Culebra, Costa Rica).

Noelia Morell Christ

Javier Torres

2018/2019



Facultad de Veterinaria
y Ciencias Experimentales
Universidad Católica de Valencia
San Vicente Mártir

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN.....	5
<i>Pocillopora damicornis</i> (Linnaeus, 1758).....	9
<i>Pocillopora elegans</i> (Dana, 1846).....	11
OBJETIVOS	16
General.....	16
Específicos	16
MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
Zona de muestreo	17
Métodos de muestreo	18
FASE 1:.....	22
FASE 2.....	22
FASE 3.....	23
Elementos del acuario	23
RESULTADOS Y DISCUSION.....	29
CONCLUSIONES.....	34
BIBLOGRAFÍA	35

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Valencia por darme la oportunidad de irme a un país tan increíble a realizar las prácticas de la carrera.

A CIMAR, por permitirme formar parte de su equipo y ayudarme a mejorar y aprender.

A Javier, por ayudarme con la elaboración del proyecto a distancia.

A los compañeros de CIMAR por ser siempre tan atentos y en especial a Nacho, por ayudarme siempre, enseñarme y ser tan pura vida.

A mi familia, en concreto a mis padres y a mi hermana, por su paciencia y por nunca perder la fe en mí y apoyarme siempre en lo que me hace feliz.

Y a tí, Pilar, por ser mi apoyo incondicional desde que empezamos la carrera, por vivir la mejor experiencia de nuestras vidas y por haber tenido la suerte de poder compartirla.

RESUMEN

Los arrecifes de coral de Bahía Culebra han sufrido con los años un deterioro y una alteración de su equilibrio debido a actividades antrópicas y naturales. La restauración ecológica ha sido una de las disciplinas más desarrolladas para recuperar este ecosistema cobrando gran auge en las últimas décadas. En este trabajo se estudió la viabilidad de un cultivo "ex situ" de dos especies del género *Pocillopora*, así como las tasas de crecimiento y supervivencia. A partir de colonias de las especies *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans*, se obtuvieron pequeños fragmentos con los que realizamos el estudio. Se registró una supervivencia del 73% para *P. damicornis* y 94% para *P. elegans*, estableciendo que el tamaño del fragmento es proporcional a la supervivencia. Se obtuvo un crecimiento para *P. damicornis* de 1 cm/mes y 0.7 cm/mes para *P. elegans*, demostrando que el proceso de crecimiento "ex situ" es hasta 7 veces mayor que en su hábitat natural. El control diario de los corales y los parámetros de los acuarios fueron fundamentales para el buen desarrollo de las colonias que, en un futuro, serán reubicadas en el arrecife para restaurar la zona afectada.

Palabras clave: *Pocillopora*, "ex situ", restauración, parámetros, crecimiento, supervivencia.

ABSTRACT

Coral reefs of Bahia Culebra have suffered over the years a deterioration and alteration of its balance due to anthropic and natural activities. The ecological restoration has been one of the most developed disciplines to recover this ecosystem, gaining great importance in the last decades. This study investigated the growth, survival/mortality rates and the viability of an "ex situ" culture of two of the most abundant reef-building corals in the North Pacific of Costa Rica (*Pocillopora damicornis* and *Pocillopora elegans*). We record a survival of 73% for *P. damicornis* and 94% for *P. elegans*. There was a significant positive relationship between fragment size and survival rate. A growth of 1 cm/month was obtained for *P. damicornis* and 0.7 cm/month for *P. elegans*, fulfilling the purpose of accelerating the growth process up to 7 times more than in its natural environment. The daily control of corals and aquarium parameters were essential for the proper development of the colonies that, in the future, will be relocated to the reef to restore the affected area.

Key words: *Pocillopora*, "ex situ", restoration, parameters, growth, survival.

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes coralinos son ecosistemas de gran importancia ecológica y económica, ya que albergan alrededor del 25% de las especies marinas, que utilizan estas estructuras como zona de refugio y de alimentación (Birkeland, 1997; Spalding *et al.*, 2001; Carballo *et al.*, 2010).

El filo Cnidaria agrupa, entre otros, a los corales duros, que se caracterizan por secretar esqueletos de carbonato de calcio (CaCO_3). (Reyes *et al.*, 2010).

Actualmente se conoce un total de 1.574 especies de corales duros pertenecientes a grupos como Hydrozoa, que agrupa 260 especies de los órdenes Milleporida (familia Milleporidae) y Stylasterida (familia Stylasteridae) y el grupo Anthozoa al que pertenecen las restantes 1.314 especies del orden Scleractinia (Cairns *et al.*, 1999).

Los corales tienen una anatomía simple que consiste en un cuerpo con forma de copa, con una única abertura central rodeada por tentáculos, que tiene función de boca y de ano. La mayor parte de los miembros de este grupo fijan su cuerpo al sustrato y en esta forma son conocidos como pólipos. Los pólipos pueden reproducirse asexualmente dividiéndose para formar colonias, lo cual es típico de los corales formadores de arrecifes. Éstos poseen dinoflagelados simbióticos llamados zooxantelas, que les permiten sobrevivir en un ambiente relativamente pobre en materia orgánica, como son los mares tropicales, debido a los excedentes fotosintéticos liberados por el alga que pueden ser aprovechados por el pólipo. A cambio, éste le proporciona protección y un hábitat. (Falkowski *et al.*, 1984).

Su proceso de construcción consiste en el crecimiento de las colonias de pólipos. Como parte de su fisiología, los corales duros (Escleractinios) forman esqueletos externos de carbonato de calcio, que se unen entre sí para formar colonias de material duro, que crecen unas sobre otras a lo largo de miles de años en un proceso dinámico constante. Las colonias más antiguas van muriendo y otras nuevas crecen sobre ellas y el espacio que queda entre las colonias muertas, es ocupado por la deposición de arena y algas calcáreas. De esta manera se consolida un material rocoso que continúa compactándose por acción del peso del arrecife, que sigue creciendo hacia arriba, albergando gran cantidad de especies como peces, esponjas, moluscos, algas, pastos marinos, crustáceos y muchos otros grupos. Este proceso a lo largo de muchos siglos, levanta arrecifes desde el fondo marino hasta emerger de la superficie del mar y puede formar islas (Basurto-Lozano, 2006).

Debido a su proceso de formación, un arrecife desarrollado incluye zonas con diferentes profundidades y grados de exposición a corrientes. Esta diversidad de zonas es uno de muchos de los factores que les permiten albergar una gran riqueza de especies. Por ejemplo, la cobertura de algas en las zonas someras con más

penetración de luz, es siempre mayor que en las zonas profundas, razón por la cual dominan las especies de peces herbívoros. En las zonas más profundas del arrecife hay menos algas y más corales, por lo que son más abundantes las especies que se alimentan de coral o de detritos. En cuanto a las especies sésiles (anémonas, esponjas, etc), aquellas bien adaptadas a establecerse y resistir fuertes intensidades del oleaje, se encuentran en zonas más someras, mientras que otras más vulnerables al embate de las olas, se encuentran a mayor profundidad o en zonas protegidas del arrecife, como la laguna arrecifal. (Gutiérrez *et al*, 1993).

Los arrecifes coralinos se desarrollan en aguas claras y cálidas, es decir, aguas con poca materia orgánica en suspensión. Estas aguas permiten la penetración de radiación solar que es utilizada por las zooxantelas, que ayudan a los corales a procesar el carbonato de calcio que formará su esqueleto y producen la mucosidad para limpiar los sedimentos que se depositan en su superficie. Habitan entre los 0 y 50 m de profundidad, principalmente en aguas con salinidades entre 33 y 36 ups (Díaz *et al.*, 2000; Veron, 2000).

Los beneficios que proporciona un arrecife de coral saludable son los siguientes.

1. Hábitat: Hogar de más de 1 millón de especies acuáticas incluidas cientos de especies de peces.
2. Ingresos: Miles de millones de dólares y una gran cantidad de trabajos en más de 100 países alrededor del mundo, destacan los beneficios económicos proporcionados por el turismo recreativo y las actividades pesqueras. (Carballo *et al.*, 2010).
3. Alimento: Para la población que vive cerca de los arrecifes de coral especialmente en zonas insulares.
4. Protección: Es una barrera natural de protección a ciudades costeras, comunidades y playas. Se han realizado varios intentos para estimar el valor de los arrecifes de coral en términos monetarios.

Los beneficios se pueden categorizar en dos tipos:

- Valor de uso directo: pesquerías e industria turística.
- Valor de uso indirecto: beneficios de protección de zonas costeras.

De acuerdo con estimaciones de la Organización de Naciones Unidas (ONU), el valor económico total de arrecifes de coral oscila entre 100.000 y 600.000 dólares americanos en km²/año.

Se estima que el 29% de los arrecifes del mundo han sido destruidos y no muestran probabilidades inmediatas de recuperarse, el 34% se encuentran bajo inminente riesgo de colapsar por las presiones humanas y un 37%, bajo una amenaza de colapso a largo plazo. Las principales causas de impacto sobre los arrecifes de coral son los

fenómenos naturales, las presiones humanas directas, incluida la contaminación por sedimentos y nutrientes de la tierra, sobreexplotación y prácticas dañinas de pesca, modificación de ingeniería de las costas; y las amenazas globales del cambio climático que provocan el blanqueamiento de los corales y el aumento del nivel del mar. (Wilkinson, 2010). En los últimos años, el cambio climático global (por un lado incrementando los eventos de blanqueamiento coralino y la mortandad de los corales, y por otro la acidificación de los océanos) ha emergido como la mayor amenaza para la supervivencia de los arrecifes de coral. La capacidad de estos ecosistemas para recuperarse de eventos anormales de calentamiento, tormentas tropicales y otras perturbaciones fuertes, está profundamente afectada por el nivel de los impactos crónicos antropogénicos. Cuando los arrecifes son saludables y no están estresados, pueden recuperarse rápidamente, tardando entre 5 y 10 años (Edwards & Gómez, 2007), por lo que se denominan resilientes, ya que tienen la capacidad de absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad; pudiendo regresar a su estado original una vez que la perturbación ha terminado. A diferencia de esto, los arrecifes que ya se encuentran afectados por las actividades humanas, a menudo muestran una baja capacidad de recuperación. Los impactos naturales han afectado a los arrecifes de coral durante miles de años y éstos se recuperaban de forma natural. Se estima que aproximadamente un 40% del 16% de los arrecifes del mundo que fueron seriamente afectados por el inusual calentamiento de los océanos durante el fenómeno del Niño (ENSO) en 1998, se están recuperando o ya se recuperaron (Wilkinson, 2010).

Los arrecifes de coral costarricenses muestran claros signos de deterioro por las alteraciones de origen antropogénico (principalmente el aumento de la carga de sedimentos terrígenos y la extracción de corales), así como por los impactos producidos por los efectos del cambio climático en fenómenos como El Niño, que ha generado la pérdida de hasta un 20% de los arrecifes coralinos del mundo en los últimos 10 años, sin mencionar que un 60% podría desaparecer en las siguientes décadas a consecuencia del cambio climático (Buddemeier *et al.*, 2004; Carballo *et al.*, 2010).

Los corales que se encuentran en el pacífico de Costa Rica pertenecen al orden Scleractinia cuyo suborden Astrocoeniina (Vaughan & Wells, 1943) contiene la familia: Pocilloporidae y dentro del suborden Fungiina (Verrill, 1865) las familias: Poritidae, Siderastidae, Agariciidae y Fungiidae.

Las dos especies utilizadas en este proyecto fueron del género *Pocillopora*, uno de los principales constructores de arrecifes en la región del Pacífico Oriental que posee una

gran diversidad de especies (Guzmán & Cortés, 1993). Este género ha estado presente desde el inicio de la formación de los arrecifes recientes hace unos 5500 años (Cortés *et al.* 1994). Actualmente, la mayor parte de estos arrecifes están muertos y cubiertos por algas coralinas incrustantes. (Glynn *et al.* 1983). Las dos especies (*Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans*) poseen la mayor tasa de crecimiento de los corales de la región, hasta 3.5 cm/año, y compiten por el espacio con el resto de las especies de crecimiento lento (Guzmán & Cortés, 1993). La especie *Pocillopora damicornis* es la más importante y abundante del género *Pocillopora* ya que se reproduce en ambas épocas tanto lluviosa como seca, mientras que *Pocillopora elegans* lo hace a mediados de la época lluviosa.

Los métodos para restaurar especies del género *Pocillopora* dan como resultado tasas de supervivencia de hasta un 95% (Yeemin *et al.* 2006; Piniak y Brown, 2008). A lo largo de los años, las tasas de crecimiento mensuales de *Pocillopora damicornis* han ido disminuyendo, desde 1976 donde se estableció una tasa de 0.33 mm/mes (Glynn, 1976) hasta 1990 donde la tasa es de 0.15 mm/mes (Von Prael, 1990), esto es debido al periodo de recuperación que sufrieron tras el fenómeno del niño (1982-1983), ya que cualquier perturbación que afecte al coral, causa una disminución de su tasa de crecimiento (Kendall *et al.*, 1985).

Las especies ramificadas como las de las familias Acroporidae y Pocilloporidae tienden a ser de crecimiento rápido y a fragmentarse fácilmente (se pueden encontrar fragmentos desprendidos naturalmente). Por ello, estas especies han sido muy útiles para el trasplante, ya que pueden producir un rápido aumento en el porcentaje de cobertura de coral vivo en un tiempo relativamente corto (Edwards & Gómez, 2007).

Procesos de restauración en el Pacífico de Costa Rica usando reproducción asexual con fragmentos, han sido exitosos. Ramas de *Pocillopora damicornis* con longitudes de 4 a 7 cm presentaron una mortalidad entre el 17 y 21% después de tres años de seguimiento (Guzmán, 1991). En el Pacífico Colombiano, también existen algunos antecedentes de estudios relacionados con restauración, particularmente en Isla Gorgona, donde se concluyó que durante las fases iniciales de proyectos de restauración con *P. damicornis*, los fragmentos grandes tendían a crecer más rápido y sobrevivían mejor durante la fase de cultivo “*ex situ*” y, por el contrario, fragmentos pequeños crecían y sobrevivían menos. También se reportó que fragmentos de *P. damicornis* entre 7 y 8 cm presentaban una supervivencia del 100% y una máxima tasa de crecimiento en el arrecife (Ishida, 2015).

Las dos especies seleccionadas para este trabajo fueron *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans*, ambas presentes en el arrecife de coral de Bahía Culebra (Pacífico Norte de Costa Rica).

***Pocillopora damicornis* (Linnaeus, 1758)**

Taxonomía:

- Reino: Animalia
- Filo: Cnidaria
- Clase: Anthozoa
- Subclase: Hexacorallia
- Orden: Scleractinia
- Familia: Pocilloporidae
- Género: *Pocillopora*
- Especie: *Pocillopora damicornis*



Figura 1: *Pocillopora damicornis*. (Guzmán & Cortés, 1993).

Características

Coral de ramificaciones delgadas y cortas de menos de 2 cm cubiertas de verrugas. Sus cálices miden entre 0.5-1.5 mm de diámetro. Colonias de color café, verdes o rosas. Puede aparecer aislada o formando estructuras arrecifales compactas y posee una alta variabilidad morfológica de la colonia. (Cortés & Guzmán, 1998).

Es común en aguas someras de arrecifes expuestos, lagunas de manglar y en pilotes de los muelles. Presentan modificaciones estructurales dependiendo del tipo de hábitat donde se encuentren, si habitan lugares expuestos a la fuerte acción de las olas, sus ramas son altamente compactas y robustas, entre tanto, en aguas profundas o protegidas, sus ramas son delicadas y abiertas (Veron, 2000).

Distribución

En Costa Rica (Figura 2): Archipiélago de las Islas Murciélago, Bahía Culebra, Bahía Brasilito, Sámara, Cabo Blanco, Punta Leona, Herradura, Manuel Antonio, Punta Uvita, Península de Osa, Golfo Dulce, Isla del Caño e Isla del Coco. Se pueden encontrar en un rango de profundidad de entre 3 y 50 m.

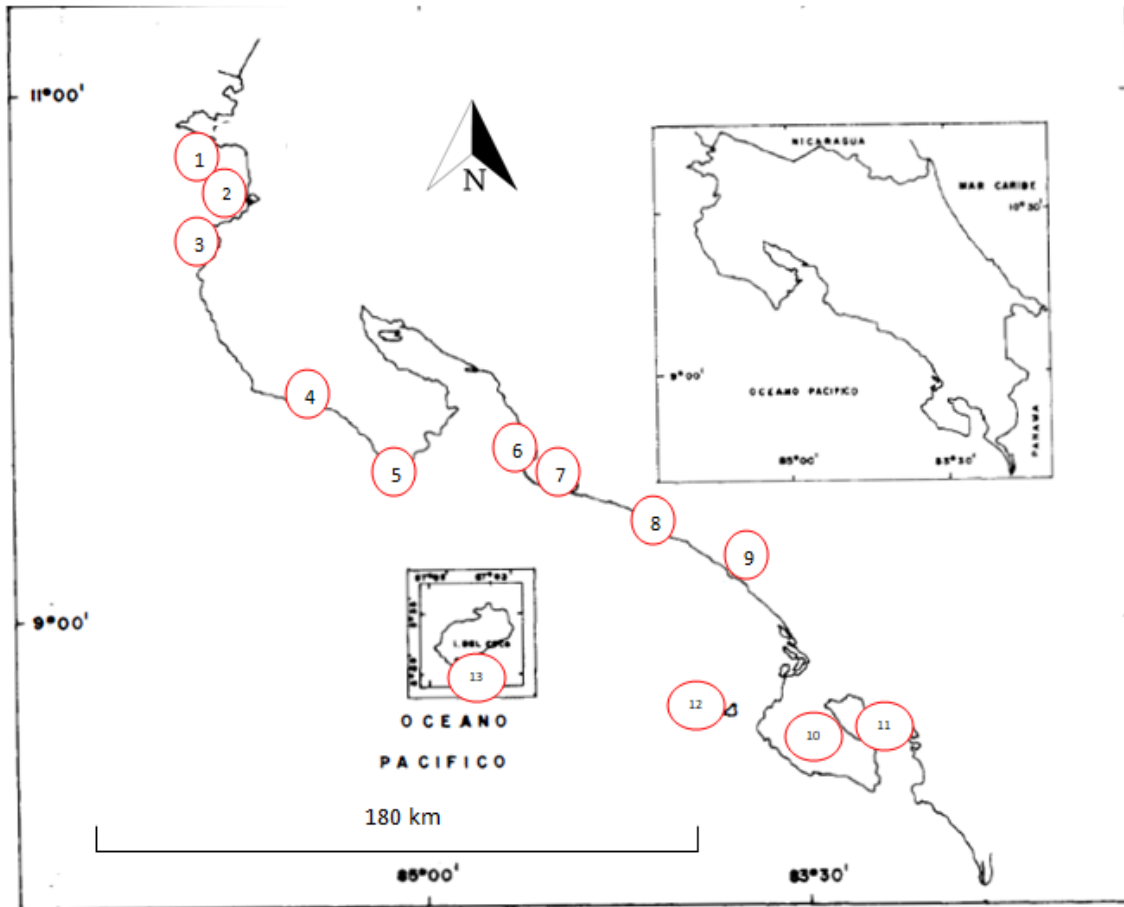


Figura 2: Costa pacífica de Costa Rica con indicación de las localidades de *P. damicornis*: 1) Archipiélago de las Islas Murciélagos, 2) Bahía Culebra, 3) Bahía Brasilito, 4) Sámara, 5) Reserva Absoluta Cabo Blanco, 6) Punta Leona, 7) Herradura, 8) Parque Nacional Manuel Antonio, 9) Punta Uvita, 10) Península de Osa, 11) Golfo Dulce, 12) Isla del Caño, 13) Isla del Coco. (Modificado de Cortés & Guzmán, 1998).

Resto del mundo: especie de distribución muy amplia. Mar Rojo, Océano Índico y Océano Pacífico (Veron, 1993).

***Pocillopora elegans* (Dana, 1846)**

Taxonomía:

- **Reino:** Animalia
- **Filo:** Cnidaria
- **Clase:** Anthozoa
- **Subclase:** Hexacorallia
- **Orden:** Scleractinia
- **Familia:** Pocilloporidae
- **Género:** *Pocillopora*
- **Especie:** *Pocillopora elegans*

Características

Coral de ramificaciones largas (más de 15 cm), de grosor entre 2 y 4 cm y extremos aplanados, con verrugas redondeadas a lo largo de las ramas, sus cálices tienen septos pequeños y la columnela (estructura calcárea, ubicada en el centro del cáliz, formada por modificaciones de los bordes internos de los septos) está ausente o es pequeña. Su tejido generalmente es de color amarillo aunque puede variar a verde. (Cortés & Guzmán, 1998).

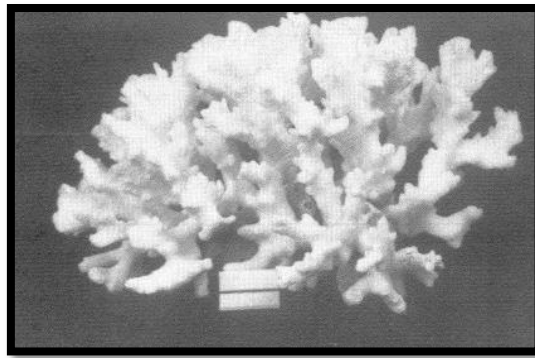


Figura 3: *Pocillopora elegans*. (Guzmán & Cortés, 1993).

Distribución

En Costa Rica (Figura 4): Archipiélago de las Islas Murciélago, Bahía Culebra, Península de Osa, Isla del Caño e Isla del Coco. Habita en zonas someras (3-10 m), sobre las crestas arrecifales. (Veron, 2000).

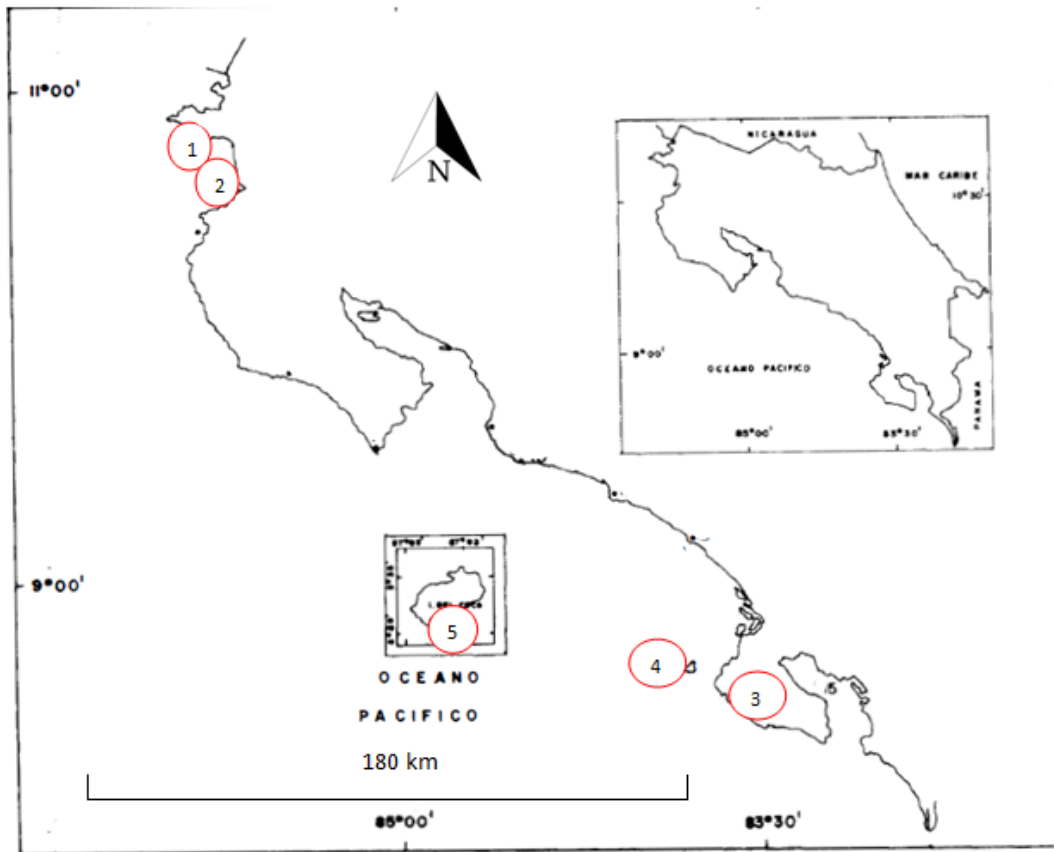


Figura 4: Costa pacífica de Costa Rica con indicación de las localidades de *P.elegans*: 1) Archipiélago de las Islas Murciélago, 2) Bahía Culebra, 3) Península de Osa, 4) Isla del Caño, 5) Isla del Coco. (Modificada de Cortés & Guzmán, 1998)

Resto del mundo: Indo-Pacífico, Pacífico Central desde Estados Unidos a Ecuador. (Reyes *et al*, 2010).

De todas las localidades donde se encuentran estas dos especies, la zona seleccionada para la ejecución de nuestro proyecto fue Bahía Culebra, una bahía relativamente cerrada, localizada dentro del Golfo de Papagayo en el Pacífico Norte de Costa Rica, que alberga playas, manglares y ensenadas. Registra una profundidad máxima de 42 m y su área aproximada es de 24 km² (Sáenz & Rodríguez-Fonseca, 2004). La plataforma continental en el área es relativamente estrecha, lo cual favorece la influencia de las aguas oceánicas en las zonas costeras (Jiménez, 2001).

Climatológicamente está influenciada por el desplazamiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical y por la acción de los vientos alisios del noreste, los cuales establecen la estación seca entre diciembre y abril y la lluviosa que se extiende de mayo a noviembre (Bednarski & Morales-Ramírez, 2004; Alfaro *et al.*, 2012). Los ecosistemas marinos de esta bahía están influenciados por un fenómeno de afloramiento costero, el cual se caracteriza por la surgencia de aguas profundas y frías, con un alto contenido de nutrientes. (Bednarski & Morales Ramírez, 2004; Fiedler & Talley, 2006; Rixen *et al.*, 2012).

Bahía culebra posee tres ambientes arrecifales los cuales son AC (arrecife coralino), CCB (comunidades coralinas sobre basaltos) y CCA (comunidades coralinas sobre arena). En 2001 se realizó un estudio de los promedios de cobertura (Tabla 1) en cada ambiente de las dos especies del género *Pocillopora*.

Tabla 1: Porcentaje promedio de cobertura \pm error estándar (Número de transectos) de corales escleractíneos en los tres ambientes arrecifales de Bahía Culebra. (Jimenez, 2001).

Especie	AC	CCB	CCA
<i>P. damicornis</i>	9.9 \pm 2.2 (40)	0.3 \pm 0.09 (68)	0.6 \pm 0.3 (12)
<i>P. elegans</i>	8.4 \pm 2.2 (48)	12.8 \pm 1.1 (140)	13.0 \pm 1.8 (44)

El coral vivo en Bahía Culebra fue la categoría dominante durante 1993-1996, pero en el periodo 2010-2011 el coral muerto obtuvo los mayores porcentajes de cobertura promedio. Esta disminución es debida al turismo ya que está basado en la explotación de los recursos naturales mediante la pesca deportiva o el buceo, lo que produce un deterioro y una alteración del equilibrio del ecosistema marino. (Alvarado *et al.*, 2018).

Muestreos en Bahía Culebra realizados entre agosto del 2016 y agosto del 2017 indican que el proceso de recuperación de estos ecosistemas es muy lento, con una capacidad de recuperación limitada por diversos factores (Sánchez-Noguera *et al.*, 2018):

- 1) El afloramiento estacional produce condiciones ambientales estresantes para los corales (baja concentración de oxígeno, bajas temperaturas y bajo pH) (Jimenez *et al.*, 2010; Rixen *et al.*, 2012), las cuales pueden resultar perjudiciales después de los eventos de mortalidad masiva.
- 2) El enriquecimiento de nutrientes por causas naturales (fenómeno de surgencia) y antropogénicas (desarrollo costero) (Morales-Ramírez *et al.*, 2001; Fernández-García, 2007; Vargas Montero *et al.*, 2008) contribuye al incremento

estacional de las macroalgas invasoras (*Caulerpa sertularioides*) (Fernández-García *et al.*, 2012) y la presencia continua de FANs (Floraciones Algales Nocivas) (Lapointe *et al.*, 2005);

- 3) Altas tasas de bioerosión reducen el sustrato disponible para la recuperación coralina.

Las actividades humanas sin control inciden directa e indirectamente en la salud de los ecosistemas marinos y al combinarse con eventos de origen natural como el afloramiento costero, el fenómeno de El Niño, calentamiento global y acidificación oceánica, pueden limitar la recuperación de estos ecosistemas.

En la última década se ha constatado que los arrecifes coralinos no siempre se recuperan naturalmente de un estrés antropogénico. Por este motivo, la restauración ecológica ha sido una herramienta utilizada para recuperar la integridad ecológica de estos ecosistemas y es por esto, que es necesario su implementación inmediata en zonas degradadas (Goreau & Hilbertz, 2005). La restauración ecológica se define como el proceso de ayuda a la recuperación de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (Clewell *et al.* 2004).

Dentro de los procedimientos más exitosos y ampliamente usados en los procesos de restauración arrecifal en el mundo, se encuentra el uso de guarderías y trasplantes. El uso de guarderías consiste en recolectar pequeños fragmentos de coral que son colocados en estructuras físicas “in situ” o “ex situ” ubicadas y construidas de manera que procesos ambientales y biológicos como la temperatura, la exposición a olas, la alimentación por parte de los peces, el biofouling, la exposición al sol y la circulación de nutrientes (entre otros factores), son controlados maximizando el crecimiento y la supervivencia de los fragmentos hasta un tamaño adecuado para ser sembrados en la zona que se pretende recuperar.

Los objetivos de este tipo de cultivos son los siguientes:

- 1) Maximizar los beneficios de una pequeña cantidad de fragmentos y, por lo tanto, minimizar los daños causados a las zonas donantes.
- 2) Desarrollar pequeñas colonias a partir de fragmentos de coral las cuales sobreviven mejor que los fragmentos que son trasplantados directamente al arrecife.
- 3) Tener bancos de pequeños corales que estén disponibles para ser trasplantados en caso de que ocurra un impacto, como el encallamiento de una embarcación, por ejemplo.

En la actualidad existen una serie de opciones prometedoras que permiten minimizar los daños colaterales relacionados con la generación de trasplantes y maximizar la eficiencia del material coralino utilizado. Esto comprende desde el cuidado en la obtención de los trasplantes, hasta la propagación sexual y asexual de los corales tanto “ex situ” (en acuarios/ sistemas cerrados o con recirculación) como “in situ” (en el mar/sistemas abiertos).

Los costes se derivan del establecimiento de los sustratos para la cría, la recolección de los fragmentos, la fijación a los sustratos y el cuidado hasta que se consideren listos para ser trasplantados. Este tipo de cultivos demandan tiempo ya que requieren de la eliminación de algas y otros organismos incrustantes que amenazan con crecer sobre los fragmentos cultivados. Cuanto más pequeños sean los fragmentos, probablemente será necesario un mayor tiempo de cultivo y un medio ambiente más benigno antes de que puedan ser trasplantados.

1. “In situ”: Fragmentos pequeños (2-3 cm) pueden cultivarse exitosamente en el mar a media agua, en criaderos bentónicos o hasta que sean lo suficientemente grandes para que sobrevivan y se trasplanten al arrecife degradado. Esto conlleva ciertos costes pero un mejor uso del material coralino. Los fragmentos grandes (3-10 cm de tamaño) son más comúnmente utilizados ya que pueden ser cultivados “in situ” sobre sustratos de cría bentónica o a media agua a un coste razonable.
2. Por un mayor precio y un proceso de cultivo de dos fases, existe el método de crear decenas de miles de pequeñas colonias de números similares de fragmentos de tamaño pequeño (1 cm en tamaño). El cultivo “ex situ” en acuarios es generalmente más caro, pero la supervivencia de estadíos tempranos o trasplantes muy pequeños (por ejemplo, fragmentos <0.5-1 cm de diámetro) es en general satisfactoria. Mediante la transferencia de los nuevos fragmentos de coral a los acuarios, éstos pueden ser criados lejos de los riesgos del ambiente natural de los arrecifes y luego ser trasplantados al arrecife cuando tengan una mayor probabilidad de sobrevivir. La supervivencia en el arrecife aumenta drásticamente con el tamaño/edad. Por ejemplo, un estudio con la especie de coral *Pocillopora damicornis*, mostró que en los acuarios la supervivencia de los nuevos reclutas fue casi 8 veces mayor después de una semana (69%) que la supervivencia en los arrecifes naturales (9%). El mismo estudio también demostró, que si los corales fueron cultivados durante 6 meses hasta que alcanzaron más de 1 cm de diámetro, éstos tenían alrededor de 25-30 veces mayores probabilidades de sobrevivir durante los 5

meses posteriores tras ser trasplantados en arrecifes naturales, que los trasplantados cuando tenían un tamaño menor a 0.3 cm (alrededor de 1 mes de edad), (Edwards & Gómez, 2007).

La evidencia muestra que el tamaño de los trasplantes es importante, con una supervivencia superior para los trasplantes de tamaños mayores. Los beneficios en términos de supervivencia pueden operar sobre un amplio rango de tamaños, desde 1 mm a 10 cm. Los trabajos con trasplantes de coral sugieren que por encima de 1 cm hay una marcada mejoría en la supervivencia; aquellos experimentos que utilizan trasplantes más grandes (más de 10 cm) han mostrado una supervivencia mayor. Los tamaños críticos pueden variar tanto con la especie como con el lugar y dependen de la cantidad y el tipo de algas (y otros organismos) que compiten por el espacio, y de la abundancia y tamaño de ramoneadores de coral como los peces loro.

Cabe destacar la escasa información existente al respecto, por lo que este estudio representa el primero en cultivo “ex situ” de las especies *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans*.

OBJETIVOS

General

Estudio de la viabilidad de un cultivo “ex situ” realizado a partir de fragmentos obtenidos de las especies *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans*.

Específicos

1. Control del crecimiento de las colonias de ambas especies.
2. Estudio de los parámetros de acondicionamiento de estos organismos en un sistema de recirculación de agua de mar artificial.
3. Determinación de las tasas de supervivencia/mortalidad de ambas especies.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de muestreo

En Marzo de 2018, se recolectaron 3 colonias madre de la especie *Pocillopora damicornis* y 2 de *Pocillopora elegans* en Playa Blanca (Figura 5) ($9^{\circ}20'13.90''\text{N}$, $83^{\circ}57'42,78''\text{W}$), ubicada en la provincia de Guanacaste, a 25 kilómetros de la Ciudad de Liberia. Se encuentra cerca de Punta Mala en Bahía Culebra y junto con otras playas forma el Golfo de Papagayo. La zona intermareal es una plataforma rocosa que parte de un acantilado de basalto con pozas y una pequeña zona de cantos rodados. El coral predominante en esta zona es del género *Pocillopora*, tanto la especie *Pocillopora damicornis*, con un promedio de cobertura de 9.9% como la especie *Pocillopora elegans* con 8.4% (Jiménez, 2001).

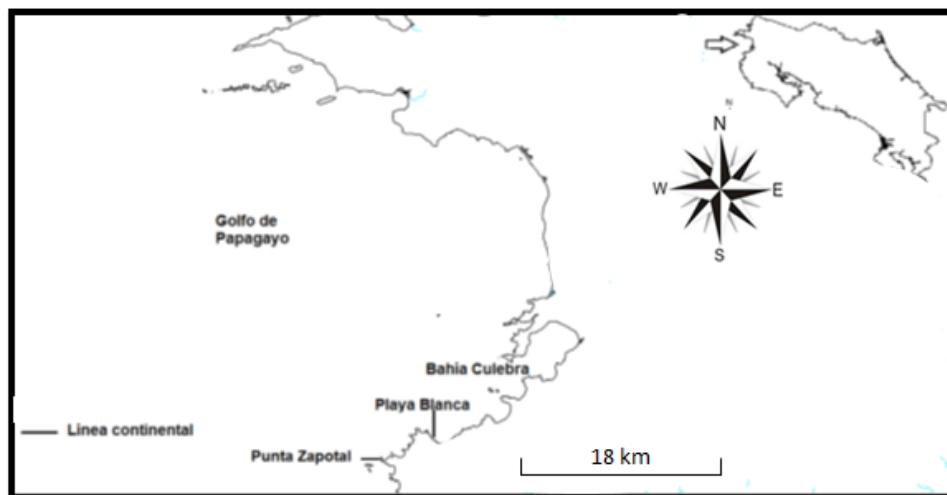


Figura 5: Ubicación de Playa Blanca. (Venegas, 2014)

La temperatura del agua es de 26°C a 27°C durante todo el año. Según Jiménez (2001) el Golfo de Papagayo presenta comunidades coralinas sobre basalto y sobre arena distribuidas a lo largo de la costa y alrededor de islotes. La abundancia de especies en estas comunidades disminuye en sitios con descarga de agua dulce y sedimentos provenientes de manglares (Jiménez *et al.*, 2010). Así mismo, la cobertura de coral vivo se relaciona de forma positiva con la protección de los sitios al oleaje. Cortés y Murillo (1985) mencionan que Bahía Culebra es la región más rica en especies de corales a lo largo de la costa Pacífica de Costa Rica. En el Golfo de Papagayo se encuentra el arrecife coralino de Playa Blanca, uno de los más importantes de la zona (Jiménez, 2007).

Métodos de muestreo

Se establecieron cuatro puntos de muestreo a lo largo del arrecife (Figura 6) donde realizamos un recorrido de aproximadamente 1.4 km para la búsqueda y recogida de los fragmentos.



Figura 6: Estaciones de muestreo establecidas a lo largo del arrecife. Google Earth 2019.

Los puntos se encontraban hasta a 6 metros de profundidad. Mediante una inmersión identificamos las especies objetivo y a su vez, registrábamos los parámetros fisicoquímicos del medio marino para el posterior acondicionamiento de los corales en el acuario. Se registró la temperatura y salinidad del agua con un CTD (Sea Bird SBE 19 plus V2) y se tomaron muestras de agua para análisis de nutrientes en el laboratorio. El método de obtención de colonias consta de la búsqueda de fragmentos de oportunidad vivos (fragmentos desprendidos naturalmente por fragmentación mecánica como resultado de algún evento externo como tormentas, mar de fondo o encallamientos; Shafir & Rinkevich, 2010). Estos fragmentos son transportados a los viveros para su aclimatación. Posteriormente, de las colonias recolectadas se obtienen fragmentos más pequeños, los cuales se fijan a un soporte y se instalan en la guardería para su crecimiento (Shafir *et al.*, 2006).

El mantenimiento de los corales se realizó en las instalaciones del laboratorio en CIMAR(Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología).

En primer lugar, fueron trasladados a unos tanques (Figura 7) preparados con aireadores para fragmentarlos, limarlos y pegarlos.



Figura 7: Tanques preparados para conservar las colonias. Fuente propia.

El material biológico para los trasplantes se obtuvo de colonias madre de unos 10 cm de longitud (Figura 8). Además, para maximizar la supervivencia de los fragmentos, se verificó que todas las colonias donantes se encontraran en un estado saludable, que no tuvieran partes de tejido con blanqueamiento parcial o total, necrosis o manchas.



Figura 8: Colonias madre. Fuente propia.

Utilizando unos alicates se dividieron en pequeños fragmentos de un tamaño entre 1-3 cm de alto y 0.5-2 cm de ancho, era muy importante que fueran más pequeños que la base del soporte de cerámica (hongo) donde íbamos a adherirlos (3 cm de ancho).

Posteriormente, las bases de los fragmentos se limaron utilizando una sierra de diamante (Figura 10) y después se adhirieron con una resina especial (Aquaforest AFix Glue) a los soportes de porcelana, previamente numerados (Figura 9).



Figura 9: Numeración de los hongos. Fuente propia. Figura 10: Sierra de diamante y alicates. Fuente propia

Cada soporte con su respectiva colonia, se colocaba en una rejilla dentro de los tranques (Figura 11) y se aplicaba con una pipeta agua a presión en la base para eliminar las burbujas que pudieran crearse, ya que pueden provocar una peor adhesión y más probabilidades de que la colonia se despegue.



Figura 11: Colonias en rejillas de plástico y en el acuario. Fuente propia.

En primer lugar preparamos 100 fragmentos de los cuales 61 pertenecían a la especie *Pocillopora damicornis* y 39 a *Pocillopora elegans* (Número menor ya que es una especie menos abundante en el medio). En la octava semana incorporamos 30 colonias nuevas, de las cuales 15 eran de la especie *P. damicornis* y 15 de *P. elegans*.

Los acuarios en los que depositamos los corales contenían un volumen de 200 litros. El primero se denomina “sump” donde se alojaban todos los equipos necesarios para el buen funcionamiento. Se encontraba conectado al acuario principal a través de tuberías de ascensos y descensos, el agua descendía y era devuelta por una bomba de ascenso.

Poseía diferentes divisiones (Figuras 12 y 13) colocadas por secciones cuya función era nivelar el agua en cada fase para evitar los desniveles que ocasionaba la evaporación. Las diferentes fases eran las siguientes:

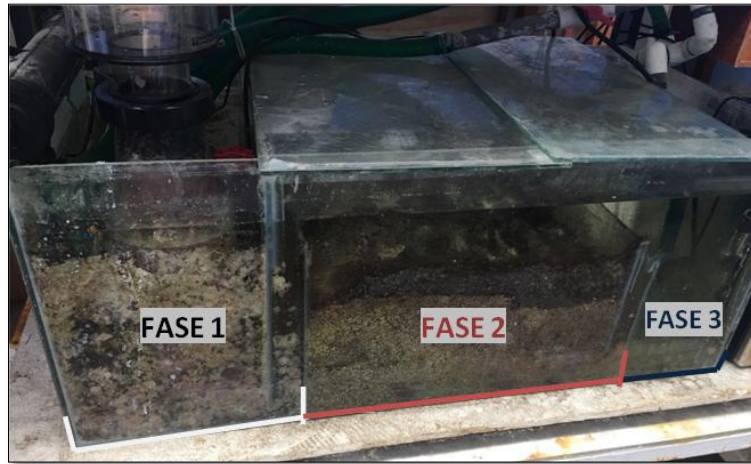


Figura 12: Fases del “sump”. Fuente propia.

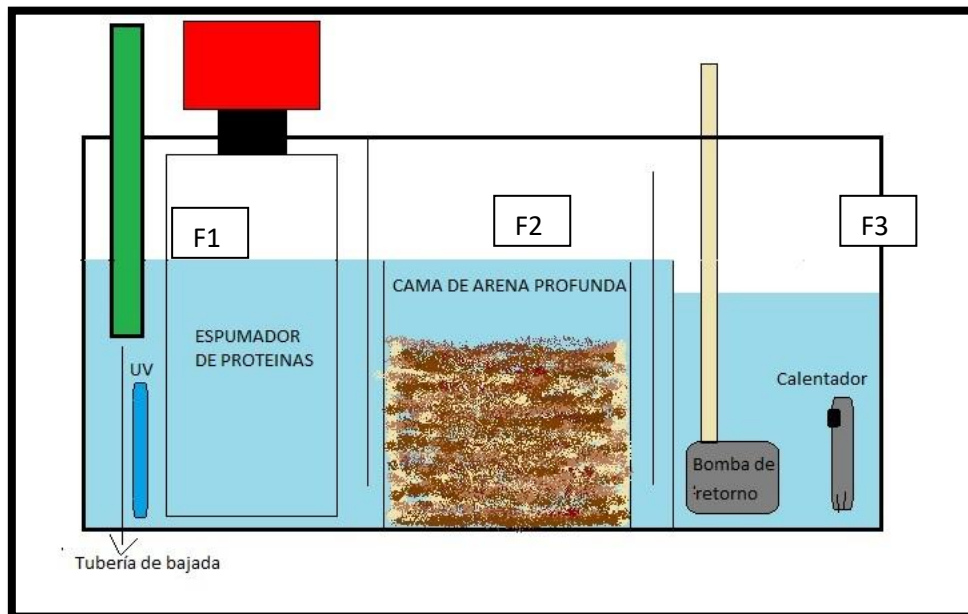


Figura 13: Esquema de las fases del “sump”. Fuente propia.

FASE 1:

Espumador de proteínas

Este equipo (Figura 14) proporciona al sistema una filtración en la cual se extraen eficazmente del agua sustancias no deseadas, evitando la contaminación del acuario sin producir ningún efecto negativo sobre los corales. Como por ejemplo, la producción de nitratos y fosfatos que favorecen la proliferación de algas.



Figura 14: Espumador de proteínas (REEF OCTOPUS Classic 150int). Fuente propia.

Los espumadores de proteínas funcionan insertando numerosas burbujas pequeñas en la cámara de agua, que presentan una enorme interfaz aire-agua para que las moléculas de proteína se adhieran. Cuantas más burbujas pequeñas residen en la cámara, más proteínas absorbe. Ésta es la única forma de filtración física que elimina los compuestos orgánicos antes de su descomposición, aligerando la carga del filtro biológico y mejorando el potencial redox del agua.

Filtro UV

Para disminuir la cantidad de microorganismos en el agua y prevenir enfermedades, se utiliza un esterilizador ultra-violeta, que provoca cambios en los enlaces químicos de las moléculas de ADN de las células expuestas, evitando su multiplicación y destruyéndolas. Así, se eliminan los microorganismos que puedan encontrarse en el agua, tales como: algas, parásitos, hongos, bacterias y virus.

FASE 2

Cama de arena profunda

Proporciona un lugar para procesar y exportar nutrientes disueltos, un lugar para reciclar los desechos, el exceso de alimentos, las heces de animales y otras partículas en formas utilizables como fuente de alimento para muchos animales de arrecife. Como lo hacen en la naturaleza, las superficies de grano de arena de los lechos en nuestros sistemas proporciona el sustrato principal para las bacterias procesadoras de nutrientes. La parte más baja es anóxica y favorece el establecimiento de

cianobacterias que realizan las reacciones de desnitrificación, que se encargan de transformar nitritos y nitratos de vuelta a amonio, un gas que sale del sistema, produciéndose una exportación de compuestos nitrogenados. Una vez establecida, contribuye en gran medida al éxito de un tanque de arrecife al proporcionar un filtro biológico y alimento.

FASE 3

Calentador

Proporciona un suministro constante de calor para compensar las pérdidas que sufren los acuarios (Figura 15); se encuentra situado en una de las paredes del acuario.



Figura 15: Calentador para peceras, Dolphin heater 200W. Fuente propia.

Elementos del acuario

Para hacer descender el agua del tanque superior al “sump” se utiliza la llamada “entrada de overflow”, una manera de utilizar succión y gravedad a la vez. La circulación completa en el acuario era imprescindible, por lo que necesitamos como mínimo dos bombas generadoras de olas/corrientes (Figura 16) situadas a cada lado del acuario.



Figura 16: Bomba generadora de olas. Fuente propia.

Realizan un papel fundamental junto a la filtración y la iluminación para un correcto desarrollo de los corales, ya que éstos extienden sus pólipos hacia la corriente con el objetivo de retener las partículas nutritivas en suspensión.

La iluminación es un factor muy importante en nuestros acuarios, ya que los pólipos presentan zooxantelas que realizan procesos de fotosíntesis contribuyendo al desarrollo del animal. Para su crecimiento producen hidratos de carbono que incorporan al organismo a partir de CO₂, luz y agua. En nuestro caso los acuarios estaban situados en una zona donde el sol incidía la mayor parte del tiempo (durante unas 8 horas aproximadamente), además, cuenta con una iluminación a base de LEDs® de 155 vatios (w) (Figura 17), que generan una iluminación constante de 230 PAR (radiación fotosintética activa), con un total de 9 horas encendidas por día simulando así las condiciones naturales.



Figura 17: Iluminación del acuario (LEDs®). Fuente: Propia

Por lo general, los sistemas con recirculación “ex situ” son utilizados en lugares donde existen restricciones para el uso del agua de mar o poca disponibilidad de ésta; por lo que se utiliza agua de mar artificial. Este sistema tiene mayores complicaciones en su manejo, ya que si el agua no es correctamente filtrada puede presentar problemas relacionados con la pérdida de elementos necesarios tales como el estroncio, el calcio y el magnesio; además, se requiere de una maduración previa del biofiltro en orden a alcanzar el equilibrio biológico y fisicoquímico del sistema de cultivo lo cual determina la producción (Cuartas, 2014).

Por ello, realizamos un control estricto de la estabilidad de los acuarios a través de la medida diaria de los parámetros considerados (5 días a la semana), que tienen establecidos unos rangos óptimos (Tabla 2) regulados a diario para el perfecto estado de nuestros corales. Los parámetros de calidad del agua se midieron una vez al día con una sonda de pH y temperatura (Apera instruments®), un salinómetro (HANNA instruments®), medidores de Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg), Alcalinidad (dKh), Nitritos (NO_2^-) y fosfatos (PO_4) primero con los kits (Reef master test kit figura 18) y posteriormente con los colorímetros HANNA instruments®.

Tabla 2: Rangos de los parámetros óptimos Modificado de (Boreman, 2008).

Parámetros	Rango agua de mar	Rango aceptable	Rango óptimo
Temperatura (°C)	21-30	24-28	26-28
Salinidad (ups)	33-37	33-38	34-36
pH	7.4-8.4	7.8-8.8	8.2-8.6
Mg(mg/L)	1260-1500	1300-1550	1150-1500
PO_4 (mg/L)	0.0-0.54	0-1	0-0.03
Calcio (mg/L)	400-430	350-500	425-450
Alcalinidad (dKh)	5.6-7	6-10	8-10



Figura 18: Kit para medir parámetros (Reef master test kit) y test para medir Magnesio. Fuente propia

Utilizamos colorímetros (Figura 19) para medir las sustancias esenciales para el crecimiento del coral y de los organismos del arrecife: calcio, carbonato y magnesio (Boreman, 2008). Los niveles de calcio disminuían a medida que los corales lo utilizaban para construir su esqueleto y lo recomendable es mantenerlo entre 400-450 (mg/l). Además, el calcio reacciona con los fosfatos, si hay mucho fosfato el calcio precipita y deja de estar disponible para que el coral lo utilice (Boreman, 2008), por ello, es necesario que los fosfatos se encuentren en un nivel muy bajo (<0.03mg/L).



Figura 19: Colorímetro de alcalinidad (HI772Checker) y colorímetro de Calcio. Fuente propia.

La alcalinidad es la medida de las concentraciones de iones de carbonato y bicarbonato disueltos en el agua. Éstos son esenciales para estabilizar el pH y la utilización de calcio en arrecifes. Los carbonatos se suministran con la mezcla de sal artificial. El magnesio participa en la construcción de los esqueletos de corales duros y evita la precipitación excesiva de calcio y bicarbonatos. Cuando las medidas resultaban por debajo de lo ideal, era necesario añadir al acuario la mezcla de cada reactivo con el agua RO/DI (Sistema de ósmosis inversa y deionización). El agua proporcionada a los corales requería pureza, por ello utilizamos un sistema que bombeaba y filtraba el agua (RO/DI) (Figura 20) así conseguíamos una deionización y una ósmosis reversible. Para mantener este tipo de acuarios es importante este filtro, ya que al tratarse de un sistema cerrado los compuestos externos podrían acumularse en grandes niveles tóxicos.



Figura 20: Filtro RO/DI. Fuente propia.

Para la realización de las fotos semanales, los corales se retiraban de los acuarios y se depositaban en tanques con agua. Conociendo la cantidad de agua retirada, había que añadir la misma cantidad mezclada con sal Aquaforest (375 gr por cada 10 L de agua RO/DI) (Figura 21).



Figura 21: Sal Aquaforest. Fuente propia

La limpieza es una parte fundamental, tanto del soporte de porcelana para liberar las partículas contaminantes o algas que impiden su crecimiento, como de los acuarios en general (las rejillas, paredes del acuario, filtro del espumador de proteínas y generadores de olas).

Las fotos realizadas semanalmente a las colonias de ambas especies, se analizaban con un programa de procesamiento de imagen digital llamado "ImageJ" que se utiliza para evaluar el crecimiento a través de medidas tales como el grosor, la altura, el área vertical y el área horizontal de cada colonia.

En las fotos se coloca una regla para establecer la escala en cm (Figura 22).



Figura 22: Proceso de fotografiado. Fuente propia.

El procesado de las medidas de altura, grosor, área horizontal y área vertical se puede observar en las figuras 22 y 23.

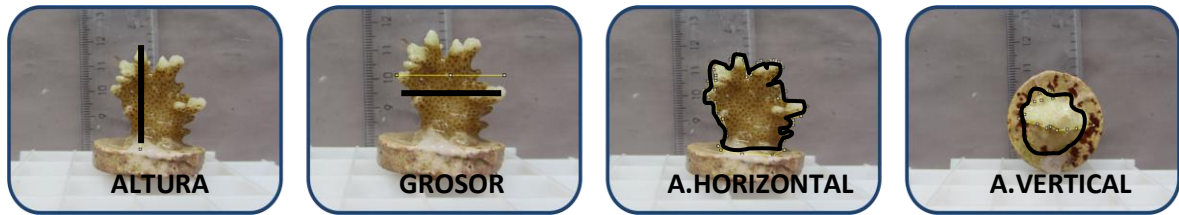


Figura 23: Procesado de imágenes con *imageJ*. Fuente propia.

De esta forma, con todos los datos procesados se puede calcular la tasa de crecimiento de los corales cada semana y realizar gráficos comparativos. Esto se realiza calculando el promedio de crecimiento semanal y mensual, añadiendo la desviación y el error estándar.

El promedio semanal se calcula:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}$$

Donde $\sum x$ es la suma de todos los datos y n el número total de datos.

También calculamos la desviación estándar de toda la población, que se trata de la medida de la dispersión de los valores respecto al valor promedio. Y por último el error estándar:

$$\text{Error estándar} = \frac{\text{Desviación estándar}}{\sqrt{n_t}}$$

También podemos determinar los porcentajes de supervivencia (% S) y mortalidad (% M) de ambas especie utilizando las dos fórmulas:

$$\% S = \frac{\sum n_f}{\sum n_i} * 100$$

Donde S es la supervivencia (%), $\sum n_f$ es el número final de organismos y $\sum n_i$ es el número inicial de organismos.

$$\% M = \frac{\sum n_m}{\sum n_i} * 100$$

Donde M es la mortalidad, $\sum n_m$ es el número de muertes y $\sum n_i$ es el número inicial de organismos. Con los parámetros fisicoquímicos realizamos tablas de promedios para determinar si las medidas ideales en nuestro caso, coincidieron con las establecidas y llevamos a cabo un cultivo “ex situ” correctamente.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla (3) muestra los parámetros de referencia de la calidad del agua y los obtenidos a partir de nuestro sistema de recirculación durante los 3 meses de ensayo (marzo, abril y mayo). Se observa como la mayoría de los parámetros se mantuvieron dentro de los rangos aceptados para el cultivo de nuestras dos especies, lo que indica la eficacia de nuestro sistema de cultivo “ex situ”.

Tabla 3: Parámetros de calidad del agua en el sistema de recirculación y valores de referencia. Modificado de (Boreman, 2008).

Parámetro	Rango óptimo	Meses			Promedio
		Marzo	Abril	Mayo	
Temperatura (°C)	26-28	26.1	27.1	27.9	27.03
pH (unidades de pH)	8.2-8.6	8.3	8.3	8.4	8.33
Salinidad (ups)	34-36	35.2	34.6	35.25	35
Ca (ppm)	425-450	430	438	450	439.3
Mg (ppm)	1150-1500	1140	1280	1385	1268.3
Alcalinidad (dKh)	8-10	7	8.3	8.9	8.1
Fosfatos(ppm)	0-0.03	0.025	0.026	0.025	0.025
Nitratos(ppm)	0-0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

La salinidad osciló entre 34.6 y 35.25 ups lo que indica una buena práctica, ya que cambios bruscos en la salinidad pueden provocar mortalidad de las colonias. En cuanto a la temperatura, muy importante por considerarse un factor crítico para el crecimiento, se mantuvo entre 26-27.9°C, el rango óptimo establecido, ya que evita un blanqueamiento o mortalidad por estrés térmico. La alcalinidad fluctuó en función de la concentración de calcio permaneciendo por encima de los 7 dKh, lo que indica que los productos comerciales utilizados en este estudio mostraron una buena capacidad amortiguadora, al mantener la alcalinidad del sistema. Durante el primer mes obtuvimos un valor de 7 dKh por debajo del valor óptimo, ya que fue el parámetro más difícil de mantener debido a que no introducíamos la cantidad suficiente de carbonatos, al mes siguiente conseguimos encontrar el equilibrio y aumentar los resultados.

El uso de un filtro biológico construido con roca viva permitió mantener las concentraciones de amonio y nitratos en niveles seguros para las especies lo cual coincide con lo señalado por Yuen *et al.* (2009). Además, el espumador de proteínas

disminuyó las fuentes de nitrógeno orgánico disueltas generados por desechos procedentes del alimento no digerido por el coral o del tejido muerto. El pH se mantuvo entre 8.3 y 8.4, produciendo una mayor disponibilidad de carbonatos favoreciendo el proceso de calcificación. En relación a los nutrientes, los fosfatos se encontraron por debajo de 0.03 mg/L, mientras las concentraciones de nitratos se mantuvieron a un mismo valor constante de 0.03 mg/L. Como se explicó anteriormente, en corales escleractinios, el nitrógeno y el fósforo son requeridos en bajas concentraciones por las zooxantelas simbiotas, siendo transformados con el CO₂ atmosférico en nutrientes disponibles para el coral. (Szmant, 2002). Niveles de nutrientes mayores a los encontrados en este trabajo, tienen efectos significativos sobre la fisiología de los corales, tales como la disminución de la tasa de crecimiento y de reproducción o el aumento en la susceptibilidad a la decoloración (Szmant, 2002). El bajo contenido de fosfatos y compuestos nitrogenados, indican un buen estado de la calidad del agua para el cultivo de *P.damicornis* y *P.elegans* en cautiverio. Otro de los elementos imprescindibles en la formación de los corales es el carbonato de calcio (CaCO₃), el cual se mantuvo en el rango de 430 a 450 mg/L. El calcio es utilizado por los corales para formar sus esqueletos. Este proceso de calcificación es dependiente de la luz y de la temperatura (Kajiwara, 1995).

Los 3 primeros meses teníamos 100 fragmentos de los cuales 61 pertenecían a la especie *Pocillopora damicornis* y 39 a *Pocillopora elegans*.

La mortalidad de ambas especies (Tabla 4) en total fue de 31.34%, para *Pocillopora damicornis* fue de un 26.22 %, resultados parecidos a los de Guzmán, que en 1991, estableció que las ramas de *Pocillopora damicornis* con longitudes de 4 a 7 cm presentaron una mortalidad entre el 17 y 21%. Para *Pocillopora elegans* la mortalidad fue de un 5.12 %

Tabla 4: Mortalidad y supervivencia en ambas especies respecto al número de fragmentos.

Especie	N=100 fragmentos	Mortalidad (%)	Supervivencia (%)
<i>P. damicornis</i>	61	26.22 (16)	73.78(45)
<i>P.elegans</i>	39	5.12(2)	94.88(37)

En total murieron 18 fragmentos, siete durante el mes de marzo, cuyo evento asociamos al proceso de blanqueamiento como resultado del estrés por fragmentación y manipulación del inicio del proyecto. En abril, murieron once fragmentos también por blanqueamiento, ya que hubo una semana completa de este mes donde no pudimos acceder al laboratorio y por lo tanto el sistema se desestabilizó. Durante el mes de mayo no hubo mortalidad. Durante este periodo los organismos mostraron abundante secreción de mucosa, y posteriormente la aparición de blanqueamiento, acompañado de la pérdida de tejido. Estos resultados coinciden con el estudio que realizó Jones en 2008, observó que la mortalidad en *Acropora palmata*, estuvo íntimamente ligada a eventos de blanqueamiento (pérdida de zooxantelas endosimbióticas), posiblemente por agentes infecciosos o estrés ambiental (Brown 1997, Baird & Marshall, 2002).

Después de un periodo de experimentación de tres meses de cultivo, la tasa de supervivencia para *Pocillopora damicornis* fue del 73% y para *Pocillopora elegans* del 94%. Algunos autores han indicado que fragmentos de menor tamaño son más susceptibles a la mortalidad por fragmentación, ya que los de mayor tamaño poseen más reservas energéticas y pueden recuperarse más fácilmente del estrés (Oren *et al.* 2001; Okubo *et al.* 2007). En este caso coincidimos que los fragmentos más pequeños (<1-2 cm) murieron antes, las ramas de *P.damicornis* son más finas que las de *P.elegans*, razón de más para justificar la diferencia de mortalidad entre ambas especies.

En la figura (24) se observa como en el mes de marzo concretamente en la semana 3, la colonia de *P.elegans* se encuentra en un estado más saludable que la de *P.damicornis* (Figura 25), que se encuentra en proceso de blanqueamiento y tiene asociadas algas invasoras.



Figura 24: *P. elegans* en estado saludable semana 3. Fuente propia.



Figura 25: *P. damicornis* en estado de blanqueamiento semana 3. Fuente propia.

En cuanto a las medidas realizadas con el programa *ImageJ*, pudimos determinar que la mayoría de las colonias presentaron un crecimiento constante en tamaño de 0.18 ± 0.03 cm/semana para *Pocillopora elegans* y 0.25 ± 0.06 cm/semana para *Pocillopora damicornis*. Al ser el primer estudio “ex situ” de ambas especies, no existe información para comparar resultados, excepto con los estudios ya realizados “in situ”, donde se determina que el crecimiento de ambas especies es de hasta 3.5 cm/año según Guzmán & Cortés en 1993. Los estudios “ex situ” se llevan a cabo para conseguir aumentar la velocidad de crecimiento en un periodo corto de tiempo, y por lo tanto, poder restaurar zonas degradadas de manera eficaz. En este caso, hemos conseguido un crecimiento para *P.damicornis* de 1 cm/mes y 0.7cm/mes para *P.elegans*, demostrando que hemos cumplido la finalidad de acelerar el proceso de crecimiento hasta 7 veces más que en su hábitat natural. Según Cuartas *et al.*, en su estudio realizado en 2014, a partir de un cultivo “ex situ” para la especie *Acropora*

millepora, se observó como quintuplicaron su tamaño en el periodo de seguimiento de 6 meses.

También, comprobamos que los fragmentos de tamaños mayores, además de sobrevivir mejor, obtuvieron mayores tasas de crecimiento. La relación positiva entre la tasa de crecimiento y el tamaño del fragmento está relacionada, cuanto más grande es un fragmento, mayor es la cantidad de pólipos para alimentación y también la de tejido vivo para la realización de fotosíntesis por las zooxantelas, de manera que la cantidad de recursos disponibles para compartir es mayor (Forsman *et al.* 2006). Así mismo, cuanto más pólipos, mayor es la tasa de calcificación y, por consiguiente, el aumento del tamaño del fragmento, describiendo un crecimiento exponencial con tasas que aumentan a medida que pasa el tiempo (Edmunds & Burgess 2016).

CONCLUSIONES

1. Se comprobó que el método por fragmentación es eficiente, como quedó demostrado en el seguimiento del crecimiento de los corales objeto de estudio.
2. Adaptamos los rangos óptimos de los parámetros para el mantenimiento de corales en acuarios a nuestras especies objeto de estudio, cuyos resultados se vieron reflejados en unos corales saludables.
3. Ambas especies presentan una dependencia entre el tamaño del fragmento y la supervivencia, por lo tanto, cuanto más grande sea el fragmento, mayor es su supervivencia. La tasa de supervivencia para *Pocillopora damicornis* fue del 73% y para *Pocillopora elegans* del 94%, determinando que *P. elegans* posee una mayor supervivencia por su mayor robustez en sus ramificaciones.
4. Las tasas de crecimiento de ambas especies han demostrado que el cultivo “ex situ” es una alternativa eficiente para restaurar un arrecife en un corto periodo de tiempo. En tres meses conseguimos acelerar el proceso de crecimiento hasta 7 veces más que en su hábitat natural, obteniendo un crecimiento para *P.damicornis* de 1 cm/mes y 0.7cm/mes para *P.elegans*.

Lineas futuras

Es importante que se sigan estudiando y estableciendo medidas de conservación, desarrollo y sostenibilidad de estos ambientes que proporcionan tantos beneficios a nivel global. Es necesario seguir desarrollando técnicas como el cultivo “ex situ”, con diferentes especies de coral cuyo crecimiento en acuarios se conoce que está por encima de la media, ya que es un método eficiente para restaurar arrecifes en un corto periodo de tiempo.

BIBLOGRAFÍA

- Alfaro, E.J., Cortés, J., Alvarado, J.J., Jiménez, C., León, A., Sánchez-Noguera, C., Nivia-Ruiz, J. & Ruiz, E. 2012. "Clima y temperatura sub-superficial del mar en Bahía Culebra, Golfo de Papagayo, Costa Rica", *Revista de Biología Tropical*, pp. 159-171.
- Alvarado, J.J., Beita-Jiménez, A., Mena, S., Fernández, C., Cortés, J., Sánchez-Noguera, C., Jiménez, C. & Guzmán-Mora, A.G. 2018. "Cuando la conservación no puede seguir el ritmo del desarrollo: Estado de salud de los ecosistemas coralinos del Pacífico Norte de Costa Rica", *Revista de Biología Tropical*, vol. 66, no. 1, pp. 280-308.
- Baird, A. & Marshall, P. 2002. "Mortality, growth and reproduction in scleractinian corals following bleaching on the Great Barrier Reef", *Marine Ecology Progress Series*, vol. 237, pp. 133-141.
- Basurto-Lozano, D. 2006. "Arrecifes coralinos, Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal". Gobierno del Estado de Veracruz, Consejo Estatal de Protección al Ambiente, Instituto de Ecología AC, vol. 1, pp. 241-263.
- Bednarski, M. & Morales-Ramírez, A. 2004. "Composition, abundance and distribution of macrozooplankton in Culebra Bay, Gulf of Papagayo, Pacific coast of Costa Rica and its value as bioindicator of pollution", *Revista de biología tropical*, pp. 105-118.
- Birkeland, C. 1997. "Life and death of coral reefs", Springer Science & Business Media, Chapman & Hall, p. 2639 .
- Boreman, E. 2008. "Introduction to the husbandry of corals in aquariums: A review", *Public aquarium husbandry series*, vol. 2, pp. 3-14.
- Brown, B.E. 1997. "Coral bleaching: causes and consequences", *Coral Reefs*, vol. 16, no. 1, pp. 129-138.
- Buddemeier RW, Kleypas JA & Aronson RB. 2004. "Coral reefs and global climate change: potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems". Pew Center for Global Climate Change, p. 56.
- Carballo JL, Bautista-Guerrero E, Nava H & Cruz-Barraza JA. 2010. "Cambio climático y ecosistemas costeros, Bases fundamentales para la conservación de los arrecifes de coral del Pacífico este". In A Hernández-Zanuy, PM Alcolado (eds), La

- Biodiversidad en Ecosistemas Marinos y Costeros del Litoral de Iberoamérica y el Cambio Climático: I. Red Cyted Biodivmar, La Habana, pp 183-193.
- Clewell, A., Aronson, J. and Winterhalder, K. 2004. "The SER international primer on ecological restoration", *Ecol Restor*, vol. 2, pp. 206-207.
- Cortés, J. & Guzmán, H. 1998. "Organismos de los arrecifes coralinos de Costa Rica: Descripción, distribución geográfica e historia natural de los corales zooxantelados (Anthozoa: Scleractinia) del Pacífico", *Revista de biología tropical*, vol. 46, no. 1, pp. 55-92.
- Cortés, J. & Murillo, M.M. 1985. "Comunidades coralinas y arrecifes del Pacífico de Costa Rica", *Rev.Biol.Trop*, vol. 33, no. 2, pp. 197-202.
- Cortés, J., Macintyre, I. & Glynn, P. 1994. "Holocene growth history of an eastern Pacific fringing reef, Punta Islotes, Costa Rica", *Coral Reefs*, vol. 13, no. 2, pp. 65-73.
- Cuartas, J.P., Cuartas, L.D. & Ruales, C.A.D. 2014. "Evaluación experimental del crecimiento de las especies *Stylophora sp* y *Acropora millepora* (corales duros) en un sistema con recirculación", *Journal of Agriculture and Animal Sciences*, vol. 2, pp. 24-33.
- Edmunds, P. J. and Burgess, S. C. (2016). "Size-dependent physiological responses of the branching coral *Pocillopora verrucosa* to elevated temperature and PCO₂", *Journal of Experimental Biology*, Vol. 219, pp 3896-3906.
- Edwards, A.J & Gomez, E.D. 2007. "Reef restoration concepts and guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty". *Coral Reef Targeted Research*, St Lucia, p. 38.
- Falkowski, P.G., Dubinsky, Z., Muscatine, L. & Porter, J.W. 1984. "Light and the bioenergetics of a symbiotic coral", *Bioscience*, vol. 34, no. 11, pp. 705-709.
- Fernández-García, C. 2007. "Propagación del alga *Caulerpa sertularioides* (Chlorophyta) en Bahía Culebra, Golfo de Papagayo, Pacífico Norte de Costa Rica (Tesis de Maestría)". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, p. 92.
- Fernández-García, C., Cortés, J., Alvarado, J. J., & NiviaRuiz, J. 2012. "Physical factors contributing to the benthic dominance of the alga *Caulerpa sertularioides*

- (Caulerpaceae, Chlorophyta) in the upwelling Bahía Culebra, north Pacific of Costa Rica". *Revista de Biología Tropical*. pp. 93-107.
- Fiedler, P.C. & Talley, L.D. 2006. "Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review", *Progress in Oceanography*, vol. 69, no. 2-4, pp. 143-180.
- Forsman, Z.H., Rinkevich, B. and Hunter, C.L. 2006. "Investigating fragment size for culturing reef-building corals (*Porites lobata* and *P. compressa*) in ex-situ nurseries", *Aquaculture*, Vol.261, pp. 89-97.
- Glynn, P.W. 1976. "Some physical and biological determinants of coral community structure in the eastern Pacific", *Ecological Monographs*, vol. 46, no. 4, pp. 431-456.
- Glynn, P.W., Druffel, E.M. & Dunbar, R.B. 1983. "A dead Central American coral reef tract: possible link with the Little Ice Age", *Journal of Marine Research*, vol. 41, no. 3, pp. 605-637.
- Goreau, T.J. & Hilbertz, W. 2005. "Marine ecosystem restoration: costs and benefits for coral reefs", *World Resource Review*, vol. 17, no. 3, pp. 375-409.
- Gutiérrez, D., García-Sáez, C., Lara, M. & Padilla, C. 1993. "Comparación de arrecifes coralinos: Veracruz y Quintana Roo", *Biodiversidad marina y costera de México*. CONABIO-CIQRO, México, DF, pp. 785-806.
- Guzmán, H.M. & Cortés, J. 1993. "Arrecifes coralinos del Pacífico oriental tropical: revisión y perspectivas", *Rev.Biol.Trop*, vol. 41, no. 3, pp. 535-557.
- Guzmán, H.M. 1991. "Restoration of coral reefs in Pacific Costa Rica", *Conservation Biology*, vol. 5, no. 2, pp. 189-194.
- Ishida, J. 2015. "Tamaño mínimo de fragmentos del coral *Pocillopora damicornis* para restauración arrecifal en el Pacífico Oriental Tropical", Tesis de pregrado, Programa de Biología, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

- Jiménez, C. 2001. "Arrecifes y ambientes coralinos de Bahía Culebra, Pacífico de Costa Rica: aspectos biológicos, económico-recreativos y de manejo", *Rev.Biol.Trop*, vol. 49, no. Supl 2, pp. 215-231.
- Jiménez, C. 2007. "Arrecifes coralinos ¿víctimas de los cambios?", *Ambientico*, vol. 171, pp. 5-7.
- Jiménez, C., G. Basse, A. Segura & J. Cortés. 2010. "Characterization of the coral communities and reefs of two previously undescribed locations in the upwelling region of Golfo de Papagayo (Costa Rica)". *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, vol. 2, pp. 95-108.
- Kajiwara, K. 1995. "Examination of the effect of temperature, light intensity and zooxanthellae concentration on calcification and photosynthesis of scleractinian coral *Acropora pulchra*", *Fac.Mar.Sci.Technol.*, Tokai University, vol. 40, pp. 95-103.
- Kendall, J., Powell, E., Connor, S., Bright, T. & Zastrow, C. 1985. "Effects of turbidity on calcification rate, protein concentration and the free amino acid pool of the coral *Acropora cervicornis*", *Marine Biology*, vol. 87, no. 1, pp. 33-46.
- Lapointe, B., Barile, P. J., Littler, M. M., & Littler, D. 2005. "Macroalgal blooms in southeast Florida coral reefs. II. Cross-shelf discrimination of nitrogen sources indicates widespread assimilation of sewage nitrogen". *Harmful Algae*, vol. 4, pp. 1106-1122.
- Morales-Ramírez, A., Víquez, R., Rodríguez, K. & Vargas, M. 2001. "Marea roja producida por *Lingulodinium polyedrum* (Peridinales, *Dinophyceae*) en Bahía Culebra, Golfo de Papagayo, Costa Rica", *Revista de biología tropical*, pp. 19-23.
- Okubo, N., Motokawa, T. & Omori, M. 2007. "When fragmented coral spawn? Effect of size and timing on survivorship and fecundity of fragmentation in *Acropora formosa*", *Marine Biology*, vol. 151, no. 1, pp. 353-363.
- Oren, U., Benayahu, Y., Lubinevsky, H. & Loya, Y. 2001. "Colony integration during regeneration in the stony coral *Favia fava*", *Ecology*, vol. 82, no. 3, pp. 802-813.
- Piniak, G.A. & Brown, E.K. 2008. "Growth and mortality of coral transplants (*Pocillopora damicornis*) along a range of sediment influence in Maui, Hawaii", *Pacific Science*, vol. 62, no. 1, pp. 39-55.

- Reyes, J., Santodomingo, N. & Flórez, P. 2010. "Corales escleractinios de Colombia", Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, José Benito Vives de Andrés. 246.
- Rixen, T., Jiménez, C. & Cortés, J. 2012. "Impact of upwelling events on the sea water carbonate chemistry and dissolved oxygen concentration in the Gulf of Papagayo (Culebra Bay), Costa Rica: Implications for coral reefs", *Revista de Biología Tropical*, vol. 60, pp. 187-195.
- Sáenz, K.R. & Rodríguez-Fonseca, J. 2004. "Avistamientos del delfín manchado, *Stenella attenuata* (Cetacea: Delphinidae) en Bahía Culebra, Costa Rica, 1999-2000", *Revista de biología tropical*, pp. 189-193.
- Sánchez-Noguera, C., Jiménez, C. & Cortés, J. 2018. "Desarrollo costero y ambientes marino-costeros en Bahía Culebra, Guanacaste, Costa Rica", *Revista de Biología Tropical*, vol. 66, no. 1, pp. 309-327.
- Shafir, S. & Rinkevich, B. 2010. "Integrated long-term mid-water coral nurseries: a management instrument evolving into a floating ecosystem", *University of Mauritius Research Journal*, vol. 16, pp. 365-386.
- Shafir, S., Van Rijn, J. & Rinkevich, B. 2006. "Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts", *Marine Biology*, vol. 149, no. 3, pp. 679-687.
- Spalding, M., Spalding, M.D., Ravilious, C. & Green, E.P. 2001. "World atlas of coral reefs", Univ of California Press.
- Szmant, A.M. 2002. "Nutrient enrichment on coral reefs: is it a major cause of coral reef decline?", *Estuaries*, vol. 25, no. 4, pp. 743-766.
- Vargas-Montero, M., Freer-Bustamante, E., Guzmán, J., & Vargas, J. C. 2008. "Florecimientos de dinoflagelados nocivos en la costa Pacífica de Costa Rica". *Hidrobiológica*, pp 15-23.
- Venegas, M. 2014. "Estado de conservación del arrecife coralino de Playa Blanca (Matapalo), uno de los arrecifes más extensos de la costa Pacífica de Costa Rica". Tesis de Maestría, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, p. 77.
- Veron, J.E. 2000. "Corals of the World, vol. 1-3", Australian Institute of Marine Science, Townsville, vol. 295, p.1382.

- Veron, J.E.N. 1993. "A biogeographic database of hermatypic corals. Species of the Central Indo-Pacific, genera of the world. Australian Institute of Marine Science, p. 453.
- Verrill, A. 1865. "XXVI.—Classification of Polyps.(Extract condensed from a synopsis of the Polyp of the North Pacific exploring expedition under Captains Ringgold and Rodgers, USN", *Annals and Magazine of Natural History*, vol. 16, no. 93, pp. 191-197.
- Von Prael, H. & Angel, B.V. 1990. "Tasa de crecimiento del coral *Pocillopora damicornis* en un arrecife costero del Pacífico Colombiano", *Revista de Ciencias*, vol. 2.
- Wilkinson, C. 2010. "Global status of Coral Reefs". Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Australia, p. 296.
- Yeemin, T., Sutthacheep, M. & Pettongma, R. 2006. "Coral reef restoration projects in Thailand", *Ocean & Coastal Management*, vol. 49, no. 9-10, pp. 562-575.
- Yuen, Y.S., Yamazaki, S.S., Nakamura, T., Tokuda, G. & Yamasaki, H. 2009. "Effects of live rock on the reef-building coral *Acropora digitifera* cultured with high levels of nitrogenous compounds", *Aquacultural Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 35-43.