

Programa de Restauración de Arrecifes Coralinos: El Caso de Dos Áreas Afectadas por Encallamiento

Coral Reef Restoration Program: The Case of Two Areas Affected by Ship Grounding

Coral Reef Programme de Restauration: Le Cas de Deux Zones Affectés par Échouement

CLAUDIA PADILLA SOUZA*¹, ELOY RAMIREZ MATA¹, MELINA SOTO¹,
JAIME GONZÁLEZ CANO¹ y ROBERTO IBARRA NAVARRO²

¹Instituto Nacional De Pesca Crip, Puerto Morelos, Calle Matamoros esq. Av. Hidalgo,
Puerto Morelos, Quintana Roo 77580 Mexico. *klaus.padilla@gmail.com

²Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, PNCOIM-PC-PN, Zona Hotelera Km 4.2,
Cancún, Quintana Roo 77580 México.

RESUMEN

Se presentan los resultados de un programa interdisciplinario para implementar acciones coordinadas para restaurar arrecifes dañados por encallamientos en el Caribe Mexicano. Participaron las siguientes instituciones: INAPESCA, CONANP, UNAM, ECOSUR y XCARET. Se logró la restauración de 2 áreas arrecifales, se consolidó un vivero de coral modular, se definió una estrategia de manejo para reclutas sexuales, y se evaluaron los patrones de sucesión. Los sitios dañados son Arrecife Cuevones (Cancún) y Arrecife Manchones (Isla Mujeres), los cuales perdieron su cobertura coralina por impacto de embarcaciones, sin mostrar una recuperación natural satisfactoria. El proyecto generó biotecnología para la producción de colonias, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual, y se diseñaron sistemas de cultivo específicos para diferentes tipos de colonias. Se llevaron a cabo diversos experimentos de alimentación y manejo para definir técnica de producción de colonias por propagación clonal. Se definieron las técnicas para producir reclutas sexuales: colecta de gametos en campo, fertilización "in vitro", cultivo de larvas, proceso de asentamiento y mantenimiento de reclutas en acuario. Se desarrolló un procedimiento para la restauración de los sitios a través de la siembra de colonias, logrando incrementar la densidad de los sitios en 4.5 col/m². A través de estas acciones se logró aumentar la cobertura coralina (biomasa), se registró un cambio en las especies de coral dominantes, mostrando mayor abundancia de especies constructoras arrecifales, se incrementó la heterogeneidad ambiental, se observó un mejoramiento de la fauna ictiológica del sitio, y se detectó actividad reproductiva en las colonias de coral que se sembraron al inicio del proyecto. Todos estos elementos contribuyen a la restitución de las funciones ecológicas de sitio, con la intención de ir construyendo sitios resilientes.

PALABRAS CLAVE: Restauración, Vivero de coral, encallamiento, propagación clonal, reclutas sexuales

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes coralinos se encuentran en un proceso serio de deterioro a nivel mundial a causa de las actividades antropogénicas relacionadas con el desarrollo costero y con el cambio climático global, lo que causa una pérdida de la cobertura coralina y de los bienes y servicios que brindan (Guzmán 1991, Ostrander et al. 2000). Uno de los disturbios antropogénicos que tiene un efecto devastador sobre los arrecifes son los encallamientos (Arellano-Guillermo et al. 2009), ya que provocan alteraciones en cadena (Jaap 2000, Precht et al. 2001). Cuando una embarcación impacta un arrecife, los efectos inmediatos son la remoción de la cobertura biótica, afectando principalmente la Cresta arrecifal, en donde predominan los corales del género *Acropora*. Esta alteración ocasiona una pérdida de la complejidad tridimensional y alteración de los sitios que sirven de refugio para muchas especies; y en ocasiones también provoca la fractura o destrucción de la propia matriz calcárea. Además, si la embarcación permanece en el sitio de encallamiento se suelen generar impactos adicionales, que van desde daño físico por la presencia de la embarcación y por las propias acciones de rescate; hasta derrame de combustibles y contaminantes en las áreas afectadas. Sin embargo, los sitios que han sido afectados por encallamiento presentan daño sobre un área definida, con una baja probabilidad de que el impacto persista o se repita, por lo que parecen ser idóneos para establecer estrategias de restauración y rehabilitación a través de la siembra de corales con la intención de recuperar su cobertura coralina y con ello la estructura y función de estos ecosistemas.

En México existen experiencias sobre la manipulación de trasplantes de coral y rescate de colonias de lesionadas, pero es evidente la falta de conocimiento sobre la dinámica particular de los sitios afectados y la disponibilidad de material vivo para llevar a cabo las acciones de restauración. Ante esta situación, se estableció una colaboración entre instituciones gubernamentales (CRIP Puerto Morelos del INAPESCA y el PNAOIMPCyPN de la CONANP), académicas (UASA-Puerto Morelos del ICMYL, UNAM y ECOSUR-Chetumal) y del sector privado (XCARET) en Quintana Roo, para atender esta necesidad desde un punto de vista multidisciplinario, a través de un proyecto financiado por la Comisión Nacional para el uso y conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO). Se conjuntó la aplicación de técnicas de Acuicultura para la propagación clonal de colonias, tanto en acuarios como en el medio marino, el conocimiento de disciplinas como la biología reproductiva y la ecología para la producción de reclutas sexuales, así como la determinación de patrones estructurales y de cambio en las comunidades, enmarcando en acciones de conservación y manejo de los sitios a restaurar. De esta manera se pretende que la estrategia de restauración además de lograr un incremento en la cobertura de coral, se logre recuperar la dinámica de la comunidad (Jaap 2000, Sánchez 2005), por lo que también es necesario evaluar el efecto de las acciones de restauración sobre la comunidad de peces en los sitios intervenidos. Bajo esta perspectiva, se reconoce la necesidad de que los programas de restauración ecológica incorporen un programa de monitoreo para evaluar su éxito e identificar si se han logrado generar cambios en la dinámica de la comunidad hasta alcanzar un estado de equilibrio (Edwards y Clark 1998, Edwards 2010).

ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El programa de restauración activa se llevó a cabo 2 sitios del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCPN): Arrecife Cuevones y Arrecife Manchones (Figura 1).

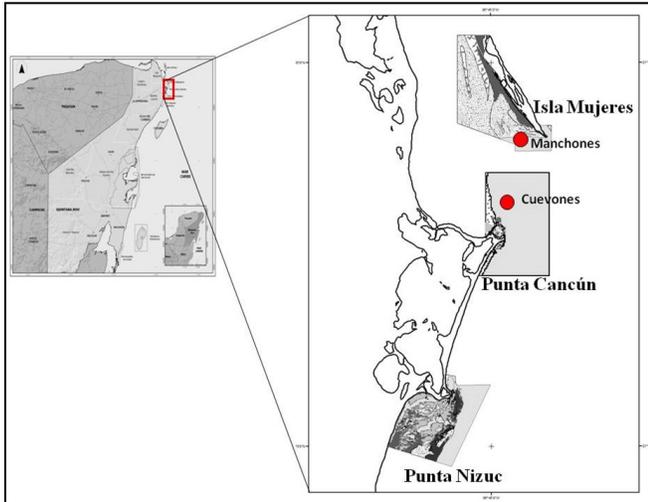


FIGURA 1. Ubicación geográfica de las 2 áreas en las que se llevaron a cabo acciones de restauración activa, dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Arrecife Cuevones

El 17 de diciembre de 1997 la embarcación Noruega tipo crucero “Leeward” impactó la estructura arrecifal denominada “Arrecife Cuevones”, afectando un área total de 480m². Este accidente ocasionó la fragmentación, abrasión y aplastamiento de la biota marina, incluyendo varias colonias de coral del género *Acropora*. El impacto también ocasionó una fractura a la estructura geológica de 2.8 m de largo y 15 cm de ancho (Figura 2).

Previo al encallamiento, esta zona tenía un uso turístico, donde se realizaba buceo SCUBA, con una afluencia promedio de 15 turistas/día. Posterior al accidente, se decidió cerrar el arrecife al turismo de manera indefinida, como una estrategia de manejo y conservación, con el fin de disminuir los impactos antrópicos que las actividades acuático-recreativas pudieran causar, y promover la pronta recuperación del arrecife; quedando solo permitidas las actividades de investigación.

El sitio del encallamiento estaba compuesto por las especies coralinas: *Porites porites*, *Porites astreoides*, *Montastraea annularis*, *Montastraea cavernosa*, *Agaricia agaricites*, *Acropora palmata*, *Acropora cervicornis* (siendo estas 2 últimas especies protegidas). Las especies dominantes en cuanto a densidad eran *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites*, mientras que las colonias de mayor tamaño estaban representadas por *Acropora palmata*. La cobertura estimada en el sitio antes del encallamiento era del 13.9% de tejido coralino vivo, reduciéndose al 1.3% después del impacto.

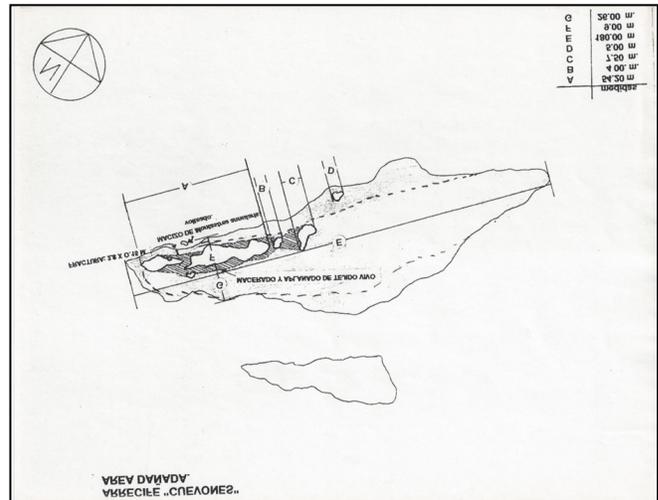


FIGURA 2. Mapa del área dañada en Arrecife Cuevones por el impacto del crucero Leeward.

Tomado de reporte interno CONANP “Descripción de la comunidad coralina afectada por el impacto de un barco de gran calado en Arrecife Cuevones, del Polígono de Punta Cancún”.

La recuperación de este sitio de manera natural había sido escasa, ya que después de 13 años sólo se había alcanzado el 4.5% de cobertura coralina (Vega-Zepeda *et al.* 2011). Esta situación alentó la implementación de medidas de manejo activas para favorecer el proceso de recuperación, al reconocer características favorables como el cierre del sitio a actividades turísticas y prácticas previas de trasplantes de coral con una sobrevivencia del 93.5% en un periodo de 9 meses.

Arrecife Manchones

Este arrecife se ubica a 1.12 km de distancia de la costa de Isla Mujeres, dentro del Polígono 1 del ANP. Está formado por varios parches coralinos separados por menos de 50 m de distancia entre sí y rodeados por arenales. En total, Manchones Grande presenta una longitud de 442 m por 88 m de ancho. Las principales especies coralinas registradas son *Acropora cervicornis*, *Acropora palmata* y *Porites astreoides*, con algunos crecimientos masivos de los géneros *Colpophyllia* y *Meandrina*. Esta unidad arrecifal es de uso turístico, donde se realiza snorkel y buceo autónomo, recibiendo un promedio de 239 turistas al día. Este arrecife se localiza entre las coordenadas geográficas 21° 11' 50.44"N – 86° 43' 29.98"W y 21° 11' 55.41"N– 86° 43' 39.62"W.

En el mes de septiembre de 2002, pobladores de Isla Mujeres reportaron una zona dañada en el arrecife Manchones Grande; el daño fue provocado por el encallamiento de una embarcación pesquera tipo camarero, sin precisar el nombre. El impacto ocurrió en tres porciones de la unidad arrecifal. El primer sitio impactado se localizó a una profundidad de 5 m, delimitada por un polígono irregular con un área estimada de 123 m². En esta área se registraron severos daños sobre colonias de coral duro (*Scleractinia* y *Milleporina*) pertenecientes a las siguientes especies: *Acro-*

pora palmata, *Acropora cervicornis*, *Millepora complanata*, *Porites porites*, *Porites astreoides*, *Agaricia agaricites* y *Siderastrea siderea*. La cobertura de tejido coralino para este sitio antes del encallamiento se estimó en 8% para toda la estructura, teniendo una disminución del 40% por efectos del impacto en la zona con mayor cobertura, siendo *Acropora palmata* la especie más afectada. La segunda porción arrecifal impactada se localiza a una profundidad promedio de 6 m y el área afectada se estimó en 44 m². Registrándose daños sobre las especies de corales duros: *Acropora palmata*, *Porites porites* y *Porites astreoides*. Siendo la especie *Acropora palmata* con mayor número de colonias afectadas, disminuyendo la cobertura de tejido coralino un 20% del total registrado antes del impacto. El tercer sitio dañado, se encuentra a una profundidad de 5 m, registrando un área afectada de 271 m², donde se observó un daño muy grave a la estructura arrecifal, ya que fueron desprendidas y fragmentadas grandes piezas del macizo coralino; los tamaños de estas piezas varió desde unos pocos cm³ hasta 1 m³. Los corales presentaron daños que van desde la fractura de ramas hasta el desprendimiento total de la colonia; las especies afectadas fueron: *Acropora palmata*, *Porites porites*, *P. astreoides* y *Agaricia agaricites*. En esta unidad arrecifal aún se realizan actividades turísticas, siendo este un punto de interés para realizar una comparación de la efectividad de una restauración activa entre un sitio sin turismo (Cuevones) y uno con turismo (Manchones).

MÉTODOS

Las acciones de restauración activa consistieron en la siembra programada de colonias en 2 sitios afectados por encallamiento, Arrecife Cuevones y Arrecife Manchones, durante 8 eventos semestrales, a partir del año 2012 y hasta el 2016. Se estableció un vivero de coral modular en donde se llevó a cabo la producción y cultivo de colonias de coral, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual, y se estableció un programa de monitoreo para evaluar el incremento de cobertura coralina de los sitios intervinidos.

Sistemas de Cultivo

La producción de colonias de coral se llevó a cabo en 3 diferentes sistemas de cultivo:

Sistema de Cultivo Controlado (SCC) — En el CRIP Puerto Morelos se estableció un sistema de cultivo controlado (SCC) que consta de 4 módulos de un sistema de soporte de vida con flujo cerrado, control de iluminación artificial, y sistema de filtración de agua, los cuales operan dentro del edificio de Acuarios. Cada módulo consta de una canaleta de 4.00 x 1.00 x 0.35 m, con un volumen total de 1,800 litros, con un sistema de generación de ola que descarga 200 litros desde un tanque elevado cada 2 minutos. Los sistemas mantienen una iluminación con lámparas de halogenuros metálicos de 250 y 400 watts y 20,000°K. Los sistemas son de flujo cerrado y se hacen cambios parciales de agua marina para su mantenimiento. La temperatura se controla a través de un enfriador entre 26 y 27°C, y el sistema de filtración es a partir de roca viva y un espumador (Figura 3).

Para estos sistemas se llevaron a cabo las actividades rutinarias de mantenimiento y limpieza de sistemas de cultivo, recambios de agua, llenado de reservorios de agua, toma de parámetros físico-químicos de acuerdo al protocolo de mantenimiento instaurado para el área de acuicultura del CRIP Puerto Morelos del INAPESCA.

Sistema de Cultivo Exterior (SCE) — El Sistema de Cultivo Exterior (SCE) se instaló en un área a la intemperie dentro del CRIP Puerto Morelos del INAPESCA, bajo un techo de malasombra, el cual consta de 8 sistemas de cultivo con un volumen de 460 litros cada uno, con flujo abierto y recambio total cada 3 horas, iluminación natural y movimiento de agua con aireación por bombas de turbina. Se estableció un protocolo de mantenimiento para las actividades de mantenimiento y limpieza de este sistema.

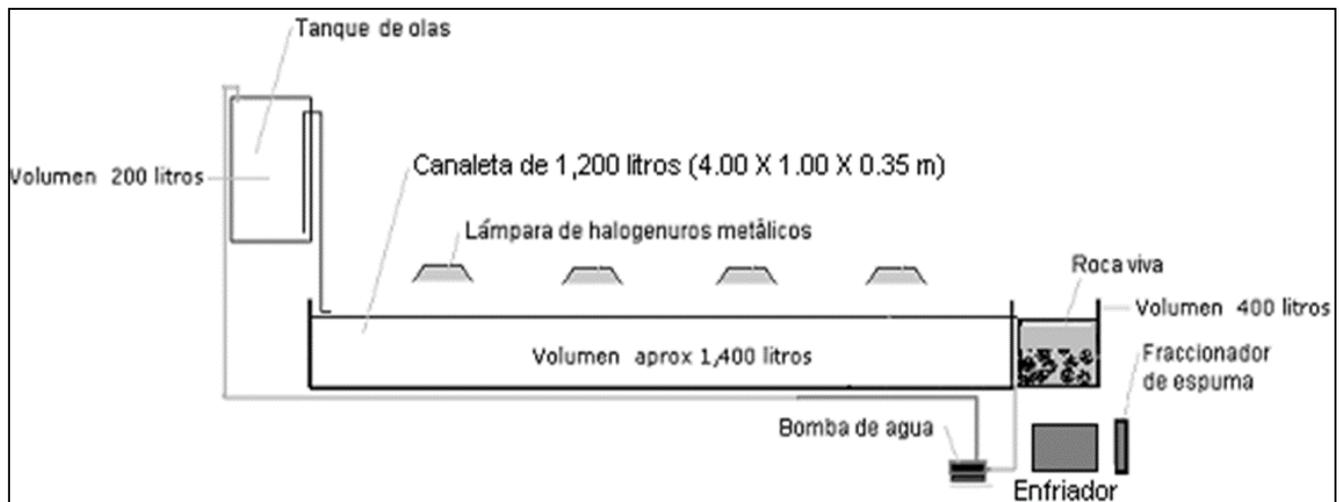


FIGURA 3. Esquema de los sistemas de cultivo controlados (SCC) del vivero de corales en el INAPESCA.

Sistema de Cultivo Marino (SCM) — Se estableció un Sistema de Cultivo Marino (SCM) en el área conocida como Bajo Pepito dentro del PNCOIMPCPN, el cual consta de 50 placas de concreto con adaptaciones de PVC para fijar 25, 30 o 36 colonias de coral cada una, para una capacidad total de 1,200 colonias de coral en el SCM (Figura 4).

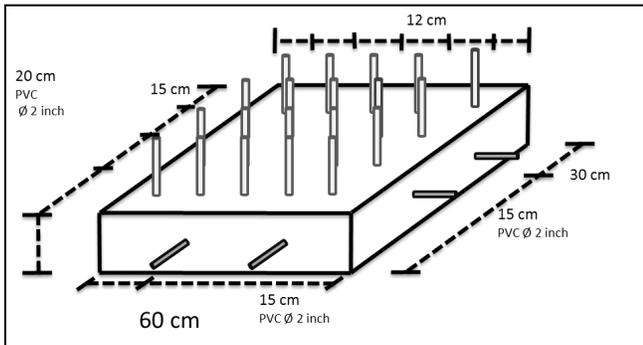


FIGURA 4. Esquema de los sistemas de cultivo marinos (SCM) del vivero de corales en Bajo Pepito, Cancún.

Producción de Colonias por Propagación Clonal

La producción de colonias por propagación clonal se llevó a cabo tanto en los sistemas de acuario (SCC y SCE), como en el sistema de cultivo marino (SCM), en 7 eventos de producción semestrales. En total se realizó una producción de 6,572 colonias en ambos sistemas: 2,781 en el SCC/SCE y 3,791 en el SCM. La producción se enfocó en las especies del género *Acropora*, representando el 60% de la producción. Los lotes de producción fueron de 400 colonias en promedio para el SCC/SCE, y de 540 colonias para el SCM (Tabla 1.)

Reproducción Sexual

Se realizó la colecta de gametos en 10 colonias de la especie *Acropora palmata* en el Arrecife El Bajito del PNCOIMPCPN durante la época reproductiva los años 2014 y 2015. Se aplicaron los protocolos definidos para la fecundación “in vitro”, el seguimiento de su desarrollo embrionario, y posterior cultivo de larvas. Se propició el asentamiento de las larvas de coral y su proceso de metamorfosis mediante la exposición de sustratos de fijación, y se llevó a cabo un seguimiento de los reclutas sexuales asentados en los sustratos. Se suministró alimento vivo y artificial a los reclutas sexuales en cultivo.

TABLA 1. Registro de lotes de producción de colonias de coral por propagación clonal para 7 eventos, por especie y por tipo de sistema de cultivo. *Acer* = *Acropora cervicornis*, *Apal* = *A. palmata*, *Oann* = *Orbicella annularis*, *Mcav* = *Montastrea cavernosa*, *Uaga* = *Undaria agaricites*, *Ppor* = *Porites astreoides*, *Dcyl* = *Dendrogyra cylindrus*.

| Evento | Sistemas de Acuarios (SCC y SCE) | | | | | | | Sistema de Cultivo Marino (SCM) | | | | | | | |
|----------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| | <i>Acer</i> | <i>Apal</i> | <i>Oann</i> | <i>Mcav</i> | <i>Uaga</i> | <i>Ppor</i> | Subtotal | <i>Acer</i> | <i>Apal</i> | <i>Oann</i> | <i>Mcav</i> | <i>Uaga</i> | <i>Ppor</i> | <i>Dcyl</i> | Subtotal |
| 1 | 800 | | | | | | 800 | 228 | 3 | 39 | 82 | 164 | 228 | | 744 |
| 2 | 31 | 21 | 12 | 4 | 68 | 27 | 163 | 600 | | | | | | | 600 |
| 3 | 493 | 73 | | | | | 566 | 87 | 577 | | | | | | 664 |
| 4 | 85 | 80 | 44 | | | | 209 | 340 | | | | | | | 340 |
| 5 | | 144 | | | | | 144 | 122 | 192 | | | | | | 314 |
| 6 | 556 | 90 | | | | | 646 | 200 | 300 | | | | | 129 | 629 |
| 7 | 19 | 188 | 20 | 26 | | | 253 | 200 | 300 | | | | | | 500 |
| Subtotal | 1984 | 596 | 76 | 30 | 68 | 27 | 2781 | 1777 | 1372 | 39 | 82 | 164 | 228 | 129 | 3791 |

Restauración Activa

Se eligió una superficie de 350 m² como área de restauración para cada uno de los 2 arrecifes: Cuevones y Manchones. En cada sitio se llevaron a cabo 6 eventos de siembras semestrales, trasplantando de 180 a 300 colonias de coral por evento por sitio, con un total de 2,507 colonias sembradas (55% *Acropora cervicornis*, 18% *Acropora palmata*, 6% *Montastrea cavernosa*, 6% *Orbicella annularis*, 10% *Porites porites*, 5% *Undaria agaricites*) (Tabla 2). Durante cada evento de siembra se realizó el marcaje del 30 % de las colonias para llevar a cabo un monitoreo trimestral que permitiera evaluar la sobrevivencia y el crecimiento de las colonias de coral que se trasplantaron en las áreas de restauración.

Monitoreo

En cada sitio se establecieron 5 cuadrantes 10 x 7 m² cada uno, y se fijaron postes de PVC en los vértices de cada cuadro para referencia del área. Este marcaje sirvió para colocar líneas de guía que permitieran visualizar el área de trabajo durante la siembra de colonias y para el levantamiento fotográfico que se llevó a cabo como parte del monitoreo del área. Para evaluar la evolución de las áreas restauradas se llevó a cabo un registro fotográfico cada 6 meses, tomando fotografías cada metro cuadrado, para lo cual se diseñó una estructura de PVC que permitió mantener la cámara a una distancia fija y tener un marco de referencia en la foto. Se llevó un registro semestral del tamaño de las colonias marcadas para estimar su crecimiento, y se realizaron censos de peces en las áreas de restauración para evaluar el efecto de la restauración sobre la fauna ictiológica.

RESULTADOS

Consolidación de Un Vivero de Coral Modular

Un aspecto relevante de este programa de restauración activa es que, a diferencia de otros proyectos, las colonias de coral que se sembraron fueron producidas en un vivero de coral modular. Este concepto de modularidad se refiere a que las colonias de coral se producen por vía sexual y asexual, y que se mantienen en diferentes sistemas de cultivo para replicar lotes de producción. Esto permite el traslado de colonias entre los módulos del vivero, de acuerdo a sus requerimientos, para finalmente ser introducidas en las áreas de restauración.

TABLA 2. Registro de eventos de siembra de colonias de coral en 2 sitios de restauración por especie. *Acer* = *Acropora cervicornis*

| Evento | Fecha | Sitio | <i>A. cer</i> | <i>A. pal</i> | <i>M. cav</i> | <i>O. ann</i> | <i>P. por</i> | <i>U. aga</i> | Total |
|--------|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 1 | Oct-13 | Cuevones | 300 | | | | | | 300 |
| | Sep-13 | Manchones | 300 | | | | | | 300 |
| 2 | May-14 | Cuevones | 180 | | | | | | 180 |
| | Mar-14 | Manchones | 110 | | | | 70 | | 180 |
| 3 | Aug-14 | Cuevones | | | 77 | 24 | | | 101 |
| | jul/ago-14 | Manchones | | | | | 180 | 133 | 313 |
| 4 | feb/mar-15 | Cuevones | 85 | 85 | | 22 | | | 192 |
| | Mar-15 | Manchones | 67 | 118 | | 22 | | | 207 |
| 5 | 15-Jul-15 | Cuevones | 90 | 90 | | | | | 180 |
| | 14-Jul-15 | Manchones | 90 | 90 | | | | | 180 |
| 6 | 7-Apr-16 | Cuevones | 72 | 31 | 48 | 37 | | | 188 |
| | 8-Apr-16 | Manchones | 70 | 34 | 26 | 56 | | | 186 |

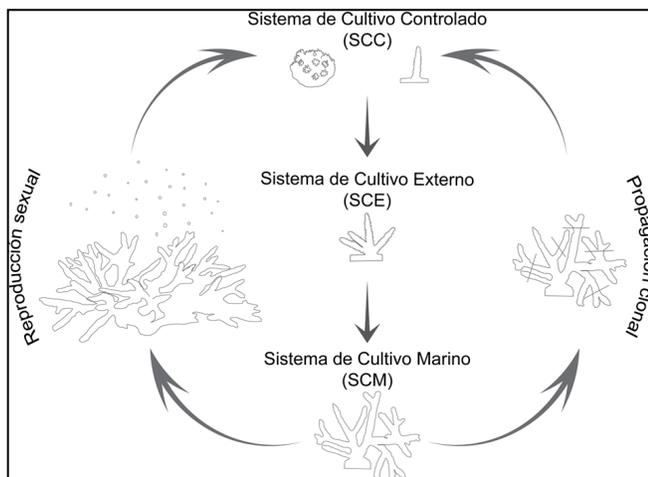


FIGURA 5. Esquema del vivero de coral modular en donde se producen colonias por propagación clonal y por reproducción sexual, y se mantienen en diferentes sistemas de cultivo para su mejor manejo.

La producción de colonias para abastecer este vivero se realizó a través de 2 procesos: la propagación clonal de colonias ya existentes, y la obtención de nuevos reclutas a partir de la reproducción sexual *in vitro*. Las colonias producidas por ambos procedimientos se mantuvieron en los diferentes módulos del vivero, tanto en acuarios como en el mar, con la intención de maximizar su sobrevivencia y crecimiento.

Del medio natural se colectan tanto los gametos que se requieren para la producción de reclutas sexuales, como los fragmentos de colonias de coral para su propagación clonal. El procedimiento de producción de colonias a partir de la reproducción sexual requiere la fecundación *in vitro* de los gametos colectados para obtener reclutas sexuales que se mantienen en los sistemas de cultivo controlado (SCC) durante los primeros 3 meses, y luego se trasladan a los sistemas de cultivo exterior (SCE) en donde se mantienen con luz natural y flujo de agua abierto. Dependiendo de la sobrevivencia y crecimiento que presentan los reclutas se-

xuales, se pueden trasladar al medio natural, ya sea al sistema de cultivo marino (SCM) o directamente a las áreas de restauración, en función del propósito que se persiga.

En el caso de la producción de colonias por propagación clonal se colectaron fragmentos de colonias del medio natural para abastecer directamente el SCM al inicio del proyecto. Algunas de estas colonias se llevaron a los sistemas de acuario en el SCE, en donde se realizaron cortes más finos y de menor tamaño para maximizar el número de colonias producidas. Estas colonias se mantuvieron en cultivo bajo esquemas de alimentación y adición de suplementos para favorecer la cicatrización, y cuando aparecían los brotes de crecimiento se trasladaron al vivero marino (SCM) para terminar su crecimiento, o se podían mantener en cultivo hasta que tuvieran un tamaño suficiente para trasladarse directamente a las áreas de restauración. A su vez, cuando las colonias en el SCM adquirían un tamaño adecuado según la especie se exportaron a las áreas de restauración. Sin embargo, conforme se fue consolidando este módulo del vivero, las colonias en cultivo también se utilizaron para nuevos lotes de producción, tanto para abastecer el mismo SCM, como para producción de nuevas colonias en sistemas de acuario en el SCE.

Incremento de Cobertura Coralina

El incremento de cobertura coralina que se logró con el programa de restauración activa a través de la siembra de corales fue de 4.7% para Arrecife Cuevones y de 5.4% para Arrecife Manchones, considerando solamente las especies intervenidas (Tabla 3).

El Arrecife Cuevones originalmente presentaba una baja cobertura coralina (8.9%), con dominancia de la especie *Porites astreoides*, siendo una especie pionera de crecimiento incrustante con baja contribución a la acreción de la estructura arrecifal. También se registró la presencia de corales constructores arrecifales del género *Acropora*, y en menor medida de los géneros *Montastrea* y *Orbicella*, con una baja cobertura (3.9%). La restauración en este arrecife consistió en incrementar de manera constante la cobertura de la especie *Acropora cervicornis* en las partes más profundas, y en ciertos eventos la siembra de colonias de los géneros *Montastrea* y *Orbicella* a lo largo del área de res-

TABLA 3. Incremento de cobertura coralina por efecto de la Restauración activa mediante siembra de corales en 2 arrecifes del PNCOIMPCPN, Quintana Roo, México. **Acropora cervicornis*, *Acropora palmata*, *Orbicella annularis*, *Montastrea cavernosa*, *Porites astreoides* y *Undaria agaricitis*.

| Situación | Arrecife Cuevones | | Arrecife Manchones | |
|----------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| | Cobertura coralina Total (%) | Cobertura coralina de especies intervenidas* (%) | Cobertura coralina Total (%) | Cobertura coralina de especies intervenidas* (%) |
| Inicial (2012) | 8.94 | 3.9 | 2.55 | 0.6 |
| Final (2016) | 12.6 | 8.6 | 8.62 | 5.9 |
| Incremento | 3.66 | 4.76 | 6.07 | 5.36 |

tauración, así como de la especie *Acropora palmata* en la parte más somera del mismo. Al final del proyecto se logró un incremento del 3.6% de la cobertura coralina total, pero un 4.8% de cobertura de las especies intervenidas. Esta diferencia se debe a que se registró un decremento paulatino en la cobertura de *Porites porites*, que en total representó el 1.1% (Figura 6).

En Arrecife Manchones la situación inicial era de muy baja cobertura coralina (2.55%), con alta dominancia de la especie *Porites astreoides*, ya que la presencia de otras especies de coral solo representaba el 0.6%. La restauración en este sitio también consistió en una siembra paulatina de la especie *Acropora cervicornis* a lo largo de toda el área de restauración, debido a que era la especie abundante en este lugar, con eventos espaciados de siembra de colonias de la especie *Acropora palmata* en las partes más someras, así como de colonias de las especies *Montastrea cavernosa*, *Orbicella annularis*, *Porites porites* y *Undaria agaricitis* en toda el área de restauración. Como resultado de las acciones de restauración ejecutadas en este sitio se logró un incremento de la cobertura coralina total de un 6.1%; lo cual incluye un aumento del 5.4% de cobertura coralina de las especies intervenidas, ya que en este sitio la especie *Porites astreoides* presentó un ligero incremento del 0.7% (Figure 7).

Incremento de Fauna Ictiológica

En ambos sitios de restauración se registró un incremento considerablemente en la riqueza de especies de peces, después de 2 años de haber iniciado los eventos de siembra de colonias de coral, registrando un incremento de 17 especies para Arrecife Cuevones, y de 20 especies para Arrecife Manchones; lo que representa aproximadamente el doble de especies en cada sitio.

En ambos sitios se registró un incremento en el número de especies de importancia comercial en la región. En Arrecife Cuevones se observa un aumento de los peces de la familia Haemulidae y Lutjanidae, siendo común encontrar cardúmenes de 20 o más individuos. El número de especies de herbívoros de los géneros *Scarus* y *Sparisoma* aumentó de 2 a 7 especies, aunque su abundancia aún es baja, siendo ejemplares juveniles la mayoría de ellos. En Arrecife Manchones se observó un incremento importante en las especies de la familia Haemulidae, con la presencia de cardúmenes frecuentes en el área. El número de especies de herbívoros de los géneros *Scarus* y *Sparisoma* también se incrementó en este sitio, teniendo 4 especies al inicio y un registro de 7 al final.

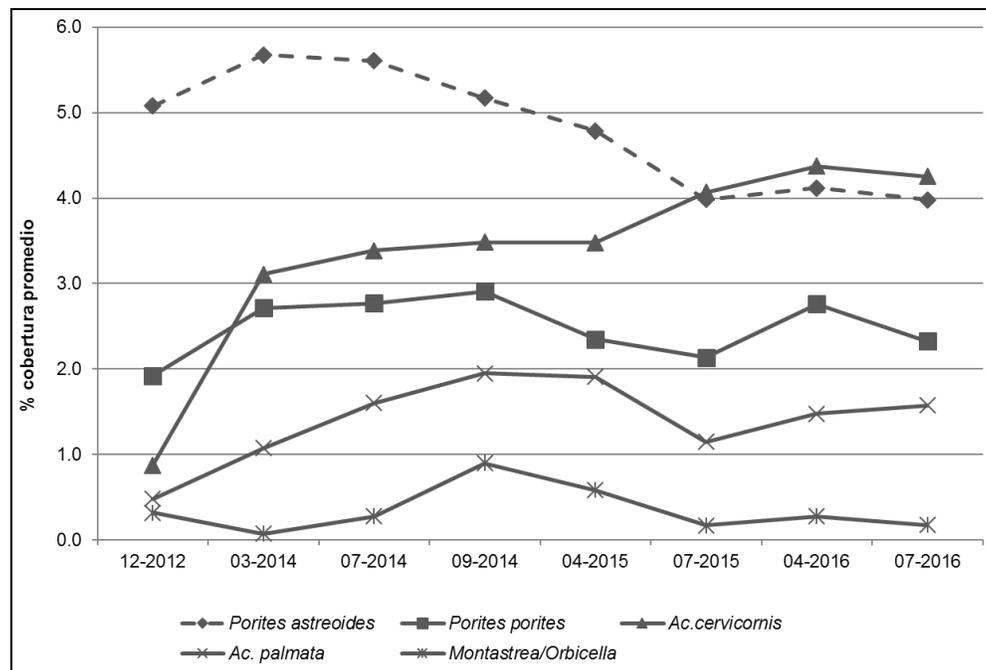


FIGURA 6. Efecto de la restauración activa en el incremento en la cobertura coralina por especie en Arrecife Cuevones, Punta Cancún, del PNCOIMPCPN.

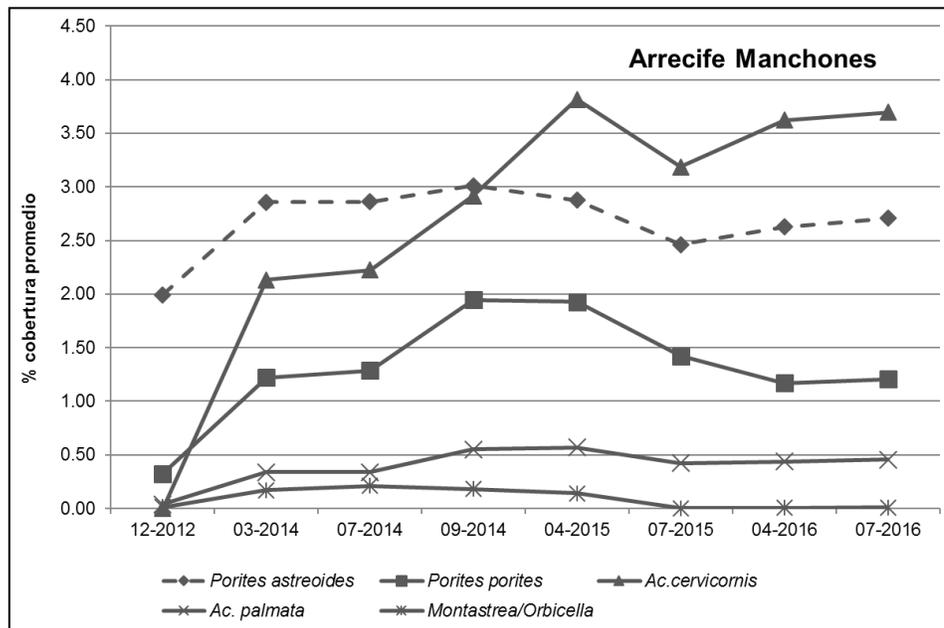


FIGURA 7. Efecto de la restauración activa en el incremento en la cobertura coralina por especie en Arrecife Manchones, Isla Mujeres, del PNCOIMPCPN.

DISCUSIÓN

Las acciones de restauración activa que se realizaron en este estudio sientan un precedente en cuanto a la visión para implementar esta medida de manejo en áreas arrecifales dañadas o degradadas. En primera instancia, se considera que la simple práctica de coleccionar fragmentos de coral para propagarlos en el mar y realizar siembras de coral durante eventos únicos es una medida limitada y de corto alcance. El manejo de un vivero modular para la producción y cultivo de colonias de coral bajo un esquema programado, en conjunto con la siembra de colonias de forma paulatina en las áreas de restauración, y un programa de monitoreo detallado, son elementos relevantes para construir una estrategia de restauración más robusta. La elección de los sitios a restaurar resulta ser un punto crucial para el éxito de estas acciones. Reconociendo este hecho, para iniciar este proyecto se eligieron áreas impactadas por encallamiento, en donde la recuperación natural no había logrado revertir los daños ocasionados, con la intención de que la fuente del daño ya no existiera y que fuera poco probable su reincidencia. A lo largo del proyecto se lograron fortalecer las capacidades institucionales, a través de la consolidación de las técnicas de cultivo y de la propia infraestructura, estableciendo protocolos de procedimientos para las acciones involucradas en la restauración activa mediante la siembra de colonias de coral.

De esta manera, las acciones de restauración activa que se llevaron a cabo en Arrecife Cuevones y Arrecife Manchones propiciaron la restitución de algunos atributos relacionados con la estructura y funcionamiento del ecosistema que se intervino. En cuanto a la estructura del ecosistema, la siembra de corales tuvo un efecto directo sobre la cobertura coralina, la dominancia de especies y la complejidad estructural. En Arrecife Cuevones, el incremento del 4.8%

que se logró en la cobertura de las especies constructoras arrecifales representa una ganancia de 1.2 veces la cobertura que tenían inicialmente (3.9%); mientras que en Arrecife Manchones, el incremento del 5.4% que se logró de la cobertura para estas especies representa una ganancia de 8.9 veces de la cobertura inicial (0.6%). En cuanto a la composición específica se logró un cambio en la dominancia de especies, de una situación inicial en la que la recuperación natural de los sitios había propiciado la dominancia de *Porites astreoides*, siendo una especie ruderal, de crecimiento incrustante, que no genera complejidad del hábitat, y que abunda en ambientes perturbados y/o en etapas tempranas en el proceso de la sucesión ecológica (Chornesky y Peters 1987, Green et al. 2008); transformándose en sitios donde la cobertura de esta especie fue menor al 1%, con una clara tendencia de decremento en su abundancia. Esta situación es de relevancia ecológica, ya que a través de la intervención mediante la siembra de colonias de coral se logró cambiar la composición específica para tener una mayor presencia de especies constructoras de arrecifes coralinos, principalmente del género *Acropora* por su importancia ecológica para la restauración de estos ecosistemas (Johnson et al. 2011, Griffin et al. 2012), así como de los géneros *Montastrea* y *Orbicella*, con lo que en el largo plazo se pretende tener una mayor contribución a la acreción arrecifal. Asociado a la siembra de corales, y al aumento de la cobertura coralina, también se obtuvo un incremento de la complejidad estructural por la presencia de corales ramificados y masivos, siendo otro atributo de la estructura del ecosistema que se logró mejorar de manera directa.

Los cambios estructurales que se generan en el arrecife como consecuencia de la siembra de corales también tienen un efecto indirecto sobre la funcionalidad del ecosistema. Siendo así, la complejidad estructural genera a su vez hete-

TABLA 4. Abundancia relativa de las especies de peces al inicio de la restauración (2013) y durante las actividades de siembra (2015), en Arrecife Manchones y Arrecife Cuevones. R = Raro < 1 individuo, E = Escaso = 1-5 individuos, C = Común = 5-10 ind, A = Abundante = 10-20 ind. y D=Dominante >20 ind. Las especies de importancia comercial en la región se resaltan en gris, y las de importancia ecológica (herbívoros) se muestran punteadas.

| Familia | Género | Especie | Nombre común | Cuevones | | Manchones | | |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| | | | | 2013 | 2015 | 2013 | 2015 | |
| Acanthuridae | <i>Acanthurus</i> | <i>bahianus</i> | | E | | E | R | |
| | | <i>chirurgus</i> | cirujanos | | E | | E | |
| | | <i>coeruleus</i> | | C | A | E | A | |
| Carangidae | <i>Caranx</i> | <i>ruber</i> | | | | R | | |
| Chaetodontidae | <i>Chaetodon</i> | <i>capistratus</i> | Mariposas | | R | | R | |
| | | <i>striatus</i> | | | | R | R | |
| Haemulidae | <i>Anisotremus</i> | <i>virginicus</i> | | | R | | R | |
| | | <i>carbonarium</i> | | | E | E | C | |
| | | <i>chrysargyreum</i> | | | E | | C | |
| | | <i>flavolineatum</i> | Roncos | D | D | C | C | |
| | | <i>melanurum</i> | | | E | | | |
| | | <i>plumieri</i> | | R | | | | |
| <i>sciurus</i> | R | C | | C | C | | | |
| Kyphosidae | <i>Kyphosus</i> | <i>sp</i> | | | | | E | |
| Holocentridae | <i>Holocentrus</i> | <i>coruscus</i> | | | R | | | |
| Labridae | <i>Bodianus</i> | <i>rufus</i> | Boquinete | | R | | R | |
| | <i>Halichoeres</i> | <i>bivittatus</i> | | | E | | E | |
| <i>garnoti</i> | | | | E | E | | E | |
| | | <i>radiatus</i> | | | R | | R | |
| | <i>Thalassoma</i> | <i>bifasciatum</i> | | C | E | A | E | |
| Lutjanidae | <i>Lutjanus</i> | <i>apodus</i> | Pargos | E | C | | | |
| | | <i>chrysurus</i> | | E | R | D | E | |
| | | <i>jocu</i> | | | R | | | |
| | | <i>chrysurus</i> | | | E | | | |
| Mullidae | <i>Mulloidichthys</i> | <i>martinicus</i> | | | | | R | |
| Ostraciidae | <i>Lactophrys</i> | <i>poligonia</i> | | | R | | | |
| | | <i>triqueter</i> | | R | | | R | |
| | <i>Abudefduf</i> | <i>saxatilis</i> | | | E | A | A | |
| | <i>Chromis</i> | <i>cyanea</i> | | D | C | C | E | |
| | <i>Holacanthus</i> | <i>tricolor</i> | | R | R | | R | |
| Pomacanthidae | <i>Microspathodon</i> | <i>chrysurus</i> | Ángeles y Damiselas | C | E | C | E | |
| | | <i>arcuatus</i> | | | | | R | |
| | <i>paru</i> | | | R | | R | | |
| | <i>partitus</i> | C | | | E | R | | |
| | <i>Stegastes</i> | <i>fuscus</i> | | E | | | | |
| | | <i>planifrons</i> | | E | E | C | R | |
| Scaridae | <i>Scarus</i> | <i>croicensis</i> | | | R | | R | |
| | | <i>guacamaia</i> | | | R | | | |
| | <i>taeniopterus</i> | | | R | R | R | | |
| | <i>atomarium</i> | | | | | E | | |
| Scaridae | <i>Sparisoma</i> | <i>aurofrenatum</i> | Loros | C | R | E | E | |
| | | <i>chrysopterus</i> | | R | R | E | E | |
| | | <i>rubripinne</i> | | | R | E | E | |
| | | <i>viride</i> | | | R | | E | |
| Serranidae | <i>Epinephelus</i> | <i>cruentatus</i> | Mero | R | R | | R | |
| Sphyraenidae | <i>Sphyraena</i> | <i>barracuda</i> | Barracuda | | E | | R | |
| Número de especies | | | | 19 | 36 | 17 | 37 | |

rogeneidad ambiental, ya que la presencia de corales ramificados y masivos propicia la formación de microhábitats, sitios de refugio, de crianza y alimentación para una mayor cantidad de especies, tanto de la biota sésil como de peces e invertebrados como son los equinodermos, moluscos y crustáceos. El monitoreo que se implementó en este estudio solamente registró la fauna ictiológica, mostrando un incremento de prácticamente el doble de las especies de

peces después de 2 años de haber iniciado las acciones de restauración en los sitios de estudio. Cabe resaltar el aumento de las especies de peces de importancia comercial y ecológica. Las especies de la familia Scaridae, o comúnmente loros, se relacionan con la salud arrecifal por su efecto en la remoción de algas debido a su hábito alimenticio herbívoro, favoreciendo el crecimiento de los corales al disminuir la competencia por sustrato con las algas que ha

ocasionado el cambio de fases en los arrecifes (Hughes 1994), y regulando a sus depredadores y parásitos (Bonaldo y Bellwood 2008). Se ha reportado que la reducción del hábitat y la sobrepesca son los principales factores que influyen en la comunidad de estas especies (Taylor et al. 2015). Se considera que la presencia de una comunidad estable de herbívoros es favorable para el mantenimiento de las colonias de coral sembradas en las áreas de restauración. En cuanto a las especies de importancia económica, los roncós (familia Haemulidae), los pargos (familias Lutjanidae), el boquinete (familia Labridae), los meros (familia Seranidae) y la barracuda (familia Sphyraenidae) constituyen una alta proporción de la captura regional en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (Mumby et al. 2004). A su vez, esta complejidad y heterogeneidad ambiental tienen como efecto indirecto un incremento en los componentes de biodiversidad y biomasa en los sitios intervenidos. Por último, otro aspecto que también se generó como cambio en la funcionalidad de las áreas restauradas fue la detección de actividad reproductiva en las colonias de coral de la especie *Acropora palmata* que se sembraron en Arrecife Manchones. El tamaño mínimo de las colonias sexualmente maduras para esta especie ha sido reportado en 50 cm de diámetro (Padilla 1996, Padilla y Lara 1996). Se estimó que más del 50% de las colonias de coral de esta especie que fueron sembradas en el año 2011 en Arrecife Manchones, en un área contigua al sitio de restauración, tenían un diámetro igual o mayor a 50 cm, siendo más de 100 colonias en esa área. Siendo así, se realizó un buceo nocturno durante la época reproductiva y se registró la liberación de gametos en estas colonias los días 20 y 21 de agosto del 2016 (PNCOIMPCPN 2016). Este acontecimiento es de suma relevancia, ya que anteriormente no se tenía de que colonias de coral producidas en viveros y sembradas en el medio natural presentaran actividad reproductiva, lo que significa que estas colonias se han incorporado a los procesos funcionales del arrecife donde se encuentran.

Bajo este análisis, la rehabilitación de la estructura ambiental que se logra como una serie de efectos en cadena a partir de la siembra de corales en sitios dañados permite restituir de manera paulatina las funciones ecológicas de los sitios intervenidos, con la intención de ir construyendo arrecifes resilientes, y con ello restablecer los bienes y servicios ambientales que provee un arrecife, dentro de los que se encuentra la protección a la costa durante condiciones extremas de huracanes (Mariño-Tapia et al. 2010).

A partir de los resultados logrados en este estudio, se requiere continuar trabajando en el mejoramiento de las técnicas para tener un mayor control de la representación de genotipos en las colonias producidas por propagación clonal, y un estricto registro de procedencia y destino; así como mejorar las técnicas de producción de colonias por reproducción sexual para tener una mayor proporción de reclutas sexuales (Ritson-Williams 2009), tanto en los viveros como en las áreas de restauración, para fomentar la diversidad genética de los sitios intervenidos (Tunnicliffe 1981, Vollmer y Palumbi 2007, Shearer et al. 2009). Se requiere optimizar los procesos para escalar la producción, e implementar acciones transformadoras como el resguardo de material genético en viveros marinos, e impulsar el turismo de conservación.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio se realizó con un proyecto financiado por la CONABIO con la clave JA-009. Se agradece a las siguientes personas por su participación en la realización de este estudio: INAPESCA: M. en C. Francisco Aguilar, M. en C. Heidi Monroy, M. en C. Elías Caamal, Biol. Andrés Morales, Biol. Daniela Santana, Biol. David González, Pas. Biol. Arcelia Romero; CONANP: Biol. Juan Carlos Huitrón y M. en C. Arturo González; ECOSUR: Dr. Héctor Hernández y M. en C. Isael Victoria; UNAM: Dra. Ania Banaszak, M. en C. Sandra Mendoza y M. en C. Aurora Beltrán; XCARET: Biol. Rodolfo Raigoza, Biol. Rafael Valdez y Biol. Ana Cerón.

LITERATURA CITADA

- Arellano-Guillermo, A., R. Robles de Benito y F. Aguilar-Salazar. 2009. *Manual coordinado de procedimientos ambientales, administrativos y legales para la atención inmediata a los arrecifes por encallamientos*. SEMARNAT-SEMAR-SCT-PGR-CONABIO. México, DF. 171 pp.
- Bonaldo, R.M y D.R. Bellwood. 2008. Size-dependent variation in the functional role of parrotfish *Scarus rivulatus* on the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Ecology Progress Series* **360**:237-244.
- Chornesky, E.A. y E.C. Peters. 1987. Sexual reproduction and colony growth in the scleractinian coral *Porites astreoides*. *Biological Bulletin* **172**:161-177.
- Edwards, A.J. y S. Clark. 1998. Coral transplantation: A useful management tool or misguided meddling? *Marine Pollution Bulletin* **37**:474-487.
- Edwards, A.J. 2010. *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*: St Lucia, Australia. ii + 166 pp.
- Green, D.H., P.J. Edmunds y R.C. Carpenter. 2008. Increasing relative abundance of *Porites astreoides* on caribbean reefs mediated by an overall decline in coral cover. *Marine Ecology Progress Series* **359**: 1-10.
- Griffin S, H. Spathias, T.D. Moore, I. Baums y B.A. Griffin. 2012. Scaling up *Acropora* nurseries in the Caribbean and improving techniques. *Proceedings of the 12th International Coral Reefs Symposium, Cairns, Australia*, 9-13 July 2012.
- Guzmán H. 1991. Restoration of coral reefs in Pacific Costa Rica. *Conservation Biology* **5**:189-195.
- Hughes, T.P. 1994. Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science* **265**:1547-1551.
- Jaap, W. 2000. Coral reef restoration. *Ecological Engineering* **15**:345-364.
- Johnson, M.E., C. Lusic, E. Bartels, IB Baums, DS Gillian, L Larson, D. Liman, MW Miller, K. Nedimyer y S Schopmeyer 2011. *Caribbean Acropora Restoration Guide: Best Practices for Propagation and Population Enhancement*. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia USA.
- Mariño-Tapia, I., R. Silva-Casarin, C. Enriquez-Ortiz, E. Mendoza-Baldwin, E. Escalante-Mancera y F. Ruiz-Rentería. 2010. Wave transformation and wave driven circulation on natural reefs under extreme hurricane conditions. 34th *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*. No. 32. Shanghai, China.
- Mumby, P.J., A.L. Edwards, J.E. Arias-González, K.C. Lindeman, P.G. Blackwell, A. Gall, M.I. Gorchynska, A.R. Harborne, C.L. Pescod, H. Renken, C.C.C. Wabnitz y G. Llewellyn. 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature* **427**:533-536.
- Ostrander, G., K. Armstrong, E. Knobbe, D. Gerace y E. Scully. 2000. Rapid Transition in the Structure of a Coral Reef Community: The Effects of Coral Bleaching and Physical Disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **97**:5297-5302.
- Padilla, C. y M. Lara. 1996. Efecto del tamaño de las colonias en el crecimiento de *Acropora palmata* en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* **6**:17-24.
- Padilla, C. 1996. *Demografía y Dinámica Poblacional de Acropora palmata en Quintana Roo, México. Tesis de doctorado*. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F. 145 pp.
- PNCOIMPCPN, 2016. *Doble logro en el último desove masivo de corales en Punta Nizuc e Isla Mujeres, Quintana Roo*. <https://www.facebook.com/PNCostaOccidentalIslaMujeresPCancunYPNVideos/480511922073322/>.

- Precht, W.F., R.B. Aronson y D.W. Swanson. 2001. Improving scientific decision-making in the restoration of ship-groundings sites on coral reefs. *Bulletin of Marine Science* **69**:1001-1012.
- Ritson-Williams, R., S.N. Arnold, N.D. Fogarty, R.S. Steneck, M.J.A. Vermeij, y V.J. Paul. 2009. New perspectives on ecological mechanisms affecting coral recruitment on reefs. *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences* **38**:437-457.
- Shearer, T.L., I. Porto y A.L. Zubillaga. 2009. Restoration of coral populations in light of genetic diversity estimates. *Coral Reefs* **28**(3):727-733.
- Sánchez, O. 2005. Restauración ecológica: algunos conceptos, postulados y debates al inicio del siglo XXI. En: Sánchez O, Peters E, Márquez-Huitzil R, Vega E, Portales G, Valdés M y Azuara D (eds.). *Temas sobre restauración ecológica*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, U.S. Fish & Wildlife Service y Unidos para la Conservación A.C., México.
- Taylor, B.M., S.J. Lindfield y J.H. Choat. 2015. Hierarchical and scale dependent effects of fishing pressure and environment on the structure and size distribution of parrotfish communities. *Ecography* **38**:520-530.
- Tunnicliffe, V. 1981. Breakage and propagation of the stony coral *Acropora cervicornis*. *Proceedings of the National Academy of Science* **78**:2427-2431.
- Vega-Zepeda A., R. Ibarra-Navarro, J.C. Huitrón-Baca, J. González-Cano y P.E. Vegobi-Chacon 2011. Recuperación coralina, un análisis trece años después de un encallamiento en un Parque Nacional de Cancún: Implicaciones para el manejo. *VI Congreso Mexicano de Arrecifes Coral*. Ensenada, Baja California.
- Vollmer S.V. y S.R. Palumbi. 2007. Restricted gene flow in the caribbean staghorn coral *Acropora cervicornis*: Implications for the recovery of endangered reefs. *Journal of Heredity* **98**:40-50.