

Informe final* del Proyecto JA009
Programa interdisciplinario de restauración activa para compensar daños antropogénicos en arrecifes coralinos del Caribe mexicano

Responsable: Dra. Aurora Claudia Padilla Souza
Institución: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura
Dirección: Pitágoras # 1320 3er Piso, Santa Cruz Atoyac, Benito Juárez, México,
03310, Ciudad de México
Fecha de inicio: Junio 6, 2012.
Fecha de término: Mayo 16, 2018.
Principales resultados: Informe final, fotografías, hojas de cálculo.
Forma de citar el informe final y otros resultados:** Padilla Souza, A. C., González Cano, J., Banaszak, A., Hernández Arana, H. y R. Raigoza Figueras. 2018. Programa interdisciplinario de restauración activa para compensar daños antropogénicos en arrecifes coralinos del caribe mexicano. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura. **Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JA009.** Ciudad de México.

Resumen:

En la actualidad, 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 la pérdida de su cobertura y de los bienes y servicios que brindan. En el presente proyecto se pretende establecer un programa para implementar acciones de restauración activa en dos arrecifes del Caribe mexicano con la colaboración de diversas instituciones gubernamentales, académicas y del sector privado (INAPESCA, UNAM, CONANP, ECOSUR y XCARET). En este tiempo se contempla llevar a cabo la restauración de 2 áreas arrecifales (300 m² cada una) dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, a través de siembras semestrales de fragmentos de coral que previamente hayan sido cultivados en el vivero. Se hará una determinación de la condición actual de la estructura de la comunidad (cobertura coralina, herbívora y cobertura algal), tanto en los sitios a restaurar como en uno control, y se analizarán los procesos sucesionales para determinar el grado de avance en la reestructuración comunitaria; con lo que posteriormente se podrán definir estrategias de restauración mediante patrones de sucesión. También se comparará el efecto de la restauración de un área arrecifal con uso turístico y otra cerrada a este tipo de actividad. Se establecerán programas de monitoreo trimestrales para dar seguimiento a los trasplantes fijados y estimar tasas de sobrevivencia y crecimiento. También se hará un registro fotográfico semestral.

-
- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
 - ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.

CONABIO
JA-009

**PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO
DE RESTAURACIÓN ACTIVA PARA
COMPENSAR DAÑOS
ANTROPOGÉNICOS EN ARRECIFES
CORALINOS DEL CARIBE MEXICANO**
Informe técnico

INFORME FINAL





CONABIO

PROYECTO JA-009

**PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE RESTAURACIÓN ACTIVA
PARA COMPENSAR DAÑOS ANTROPOGÉNICOS EN ARRECIFES
CORALINOS DEL CARIBE MEXICANO**

INFORME FINAL

Responsable técnico:

Dra. Aurora Claudia Padilla Souza
Centro Regional de Investigación Pesquera Puerto Morelos, INAPESCA

Colaboradores:

Dr. Jaime González Cano / M. en C. José Arturo González González
Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc
CONANP

Dra. Anastazia Teresa Banaszak
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos, ICMYL, UNAM

Dr. Héctor Abuid Hernández Arana
ECOSUR-Unidad Chetumal

Biol. Rodolfo Raigoza Figueras
Promotora XCARET, S. A. de C. V.

Período de ejecución del proyecto:

06 de junio del 2012 al 14 de octubre del 2016



PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE RESTAURACIÓN ACTIVA PARA
COMPENSAR DAÑOS ANTROPOGÉNICOS EN ARRECIFES CORALINOS
DEL CARIBE MEXICANO
PROYECTO JA-009
INFORME FINAL

Lista de Participantes

**Centro Regional de Investigación Pesquera Puerto Morelos, INAPESCA,
SAGARPA**

Biol. Eloy Ramírez Mata
M. en C. Melina Soto
M. en C. Bernardo Elías Caamal Madrigal
M. en C. Heidi Monroy Estrada
Biol. Mar. Adrián Andrés Morales Guadarrama
Biol. Mar. Astrid Daniela Santana Cisneros
Biol. Mar. David Jesús González Vázquez

**Parque Marino Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y
Punta Nizuc, CONANP, SEMARNAT**

Biol. Roberto Ibarra Navarro
Téc. Joel Ramírez Franco
Téc. Enrique Constantino Arévalo
Téc. Pedro Vegobi Chacón / M. en C. Elizabeth Arista de la Rosa

**Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos,
ICMyL, UNAM**

Biol. Aurora Urania Beltrán Torres
C. Santiago Zúñiga Cervera
M. en C. Sandra Mendoza Quiroz

ECOSUR, Unidad Chetumal

Biól. Isael Victoria Salazar
M. en C. Haydée López Adame
M. en C. Alejandro Vega Zepeda
Dra. Susana Perera Valderrama
M. en C. Elizabeth Arista de la Rosa
Biól. Humberto Bahena Basave

Acuario XCARET, Promotora XCARET, S. A. de C. V.

Ing. Rafael Váldez Cruz
Biol. Ana Isabel Cerón Flores

PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE RESTAURACIÓN ACTIVA PARA
COMPENSAR DAÑOS ANTROPOGÉNICOS EN ARRECIFES CORALINOS
DEL CARIBE MEXICANO
PROYECTO JA-009
INFORME FINAL

Tabla de contenido

Lista de Participantes.....	3
RESUMEN EJECUTIVO.....	8
Marcaje.....	9
Restauración	9
Siembras:.....	9
Sobrevivencia:.....	9
Crecimiento:.....	10
Registro fotográfico de las áreas restauradas:	11
Acuarios.....	11
Sistemas marinos	12
Sucesión.....	12
Reproducción sexual	13
Costos de la restauración	14
Logros del proyecto	15
1. ANTECEDENTES.....	17
1.1. Descripción de las condiciones del sitio a restaurar:	17
1.1.1. Arrecife Cuevones.....	17
1.1.2. Arrecife Manchones.....	19
1.2. Características y funciones del ecosistema que se pretende restaurar.	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. General.....	22
2.2. Particulares.....	22
3. MÉTODOS	23
3.1. Marcaje.....	23
3.1.1. Marcaje permanente de áreas para restauración activa.....	23
3.1.2. Marcaje permanente de área para evaluación sucesional.....	24
3.1.3. Caracterización de áreas a restaurar	25
3.2. Restauración.....	28
3.2.1. Eventos de siembra para la restauración activa en 2 sitios.....	28
a) Siembra inicial:	28
b) Siembras subsecuentes:.....	28
c) Marcaje de colonias.....	28
3.2.2. Procedimiento de siembra	30
a) Selección de colonias a sembrar:	30
b) Transporte de colonias:	30
c) Preparación de colonias para siembra:.....	31
d) Fijación de colonias al sustrato marino:	32
3.2.3. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas.	35
3.2.4. Registro fotográfico de áreas restauradas.	36
3.3. Acuarios.....	37
3.3.1. Instalación de sistemas de cultivo de corales exteriores (SCE)	37
3.3.2. Acondicionamiento de sistemas de cultivo controlados	38

3.3.3. Rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo	39
3.3.4. Colecta de fragmentos de coral	40
3.3.5. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero	42
3.3.6. Exportación de fragmentos de coral	44
3.3.7. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo (Acuario)	45
3.4. Sistemas Marinos	46
3.4.1. Instalación de sistemas de cultivo en el mar con capacidad para 1200 fragmentos	46
3.4.2. Producción de nuevos fragmentos para abastecimiento del vivero.....	46
3.4.3. Exportación de fragmentos de coral de sistemas de cultivo en mar a sitios de restauración	48
3.4.4. Monitoreo trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo.....	49
3.5. Sucesión.....	50
3.5.1. Monitoreo de los componentes estructuradores	50
3.5.1.1. Escala de 1m ²	50
3.5.1.2. Escala de 10 x 10 cm	50
3.6. Reproducción sexual	51
3.6.1. Evento reproductivo para obtención de reclutas sexuales en laboratorio.....	51
3.6.2. Sistemas de cultivo para reclutas: módulos UNAM, Xcaret e INAPESCA.....	54
3.6.3. MONITOREO de reclutas sexuales.	55
4. RESULTADOS	57
4.1. Marcaje.....	57
4.1.1. Marcaje permanente de áreas para restauración activa	57
4.1.2. Marcaje permanente de área para evaluación sucesional.....	59
4.1.3. Caracterización de áreas a restaurar	59
a) Arrecife Cuevones	59
b) Arrecife Manchones.....	67
4.2. Restauración.....	73
4.2.1. Eventos de siembra para la restauración activa en 2 sitios:.....	73
a) Siembra inicial:	73
b) Siembras subsecuentes:.....	73
4.2.3. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas:	75
Sobrevivencia:	75
Crecimiento:	77
4.2.4. Registro fotográfico de áreas restauradas:	78
a) Cuevones:	78
b) Manchones:	78
4.3. Acuarios.....	81
4.3.1. Instalación de sistemas de cultivo de corales exteriores (SCE)	81
a) Limpieza del área:	81
b) Acondicionamiento del techo para permitir el paso de la luz solar:	81
c) Cercado del área de SCE:	81
d) Fabricación de muretes para soporte de tinas:	82
e) Acondicionamiento de tinas para cultivo:	82
f) Instalación hidráulica para abastecimiento de agua marina a los SCE:	83
g) Abastecimiento de agua dulce y fabricación de lavabo:	83
h) Pruebas de flujo de agua para regular la tasa de recambio de agua diario:	83

i) Instalación de sistemas de cultivo de Artemia.....	83
j) Modificación del sistema de suministro de agua marina.	84
k) Producción de alimento vivo:	84
4.3.2. Acondicionamiento de sistemas de cultivo controlados (SCC)	85
4.3.3. Rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo	86
a) Rutina cotidiana de mantenimiento del SCE:.....	86
b) Esquema de alimentación:.....	87
c) Seguimiento de luz y temperatura en los diferentes módulos del vivero	88
c) Variación climática en SCE y control de filtros	90
4.3.4. Colecta de fragmentos de coral.....	91
4.3.5. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero.....	92
4.3.6. Exportación de fragmentos de coral	93
4.3.7. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo (Acuario)	94
a) Sobrevivencia de los lotes de producción	94
b) Crecimiento de las colonias en los lotes de producción	94
4.4. Sistemas marinos	95
4.4.1. Instalación de sistemas de cultivo en el mar con capacidad para 1200 fragmentos	95
4.4.2. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero.....	95
4.4.3. Exportación de fragmentos de coral (de SCM a sitios de restauración).....	96
4.4.4. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en SCM.....	97
4.5. Sucesión.....	98
4.5.1. Introducción.....	98
4.5.2. Métodos	98
a) Evaluación del proceso sucesional	98
b) Escala 1m ²	100
c) Escala de 10 × 10 cm	103
d) Análisis de los datos: escala 10 × 10 cm	104
e) Registro fotográfico.....	105
4.5.3. Resultados: Evaluación del proceso sucesional	106
a) Escala de parche.....	106
b) Escala 1m ²	113
c) Comparación entre los sectores de impacto sin restauración, impacto con restauración y referencia (Evaluación semestral).....	117
d) Cobertura algal	123
e) Escala 10 × 10 cm (evaluación bimestral).....	124
f) Monitoreo marzo 2018.....	128
4.6. Reproducción sexual	131
4.6.1. Evento reproductivo para obtención de reclutas sexuales en laboratorio.....	131
4.6.2. Entrega de reclutas sexuales a INAPESCA y XCARET	133
4.6.3. MONITOREO trimestral de sobrevivencia y desarrollo de reclutas sexuales	133
a) La sobrevivencia en acuarios terrestres.....	133
b) La supervivencia en viveros marinos	137
5. INDICADORES DE PROGRESO Y ANÁLISIS DE AVANCE	143
6. ANÁLISIS DE AVANCE DE TODO EL PROYECTO	145
6.1. Vivero	145
6.1.1. Acuario (SCE)	145
6.1.2. Sistema de Cultivo Marino (SCM)	145

6.1.3. Reclutas sexuales	146
6.2. Áreas a restaurar	147
6.2.1. Sobrevivencia	150
6.2.2. Crecimiento	151
6.3. Propuesta de restauración sucesional	151
6.3.1. Introducción.....	151
a) La restauración ecológica en los arrecifes de coral.....	151
b) Evidencia de deterioro previo al disturbio	152
c) El encallamiento	153
d) Diagnóstico de la condición actual.....	154
6.3.2. Efecto de la introducción de fragmentos en una porción del área afectada	155
6.3.3. Acciones recomendadas	156
6.3.4. Consideraciones finales	157
6.3.5. Literatura citada.....	157
6.4. Análisis descriptivo sobre los procesos de colonización en los tres tipos de sitio (con restauración activa, sin restauración y referencia)	159
6.5. Cálculo de los costos de la restauración	159
6.5.1. Costos de restauración mediante propagación clonal.....	159
6.5.2. Costos de producción de reclutas sexuales y siembra en sitios de restauración	167
6.6. Diagnóstico de los logros del proyecto	169
6.6.1. Elección de los sitios:	169
6.6.2. Esquema de siembras sucesivas:	169
6.6.3. Recuperación de la función y estructura en las áreas de restauración.	170
6.6.4. Establecimiento de un vivero de coral modular.....	174
6.6.5. Programa de Monitoreo:.....	177
6.6.6. Colaboración interinstitucional y fortalecimiento de capacidades.....	177
6.7. Recomendaciones	179
6.7.1. Propuestas de acciones para evitar deterioro del sistema	179
6.7.2. Consideraciones para las acciones de restauración a futuro	179
7. ANEXOS.....	181
7.1. Bases de datos:	181
7.1.1. Sitios de estudio	181
7.1.2. Inventario del vivero	181
7.1.3. Inventario del área restaurada	181
7.1.4. Proceso sucesional	181
7.2. Memoria fotográfica:.....	181
7.2.1. Registro fotográfico de las áreas restauradas.....	181
7.2.2. Registro fotográfico de los procesos sucesionales	181
7.2.3. Selección de fotos 7ª etapa.	182
8. LITERATURA CITADA	182

PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE RESTAURACIÓN ACTIVA PARA
COMPENSAR DAÑOS ANTROPOGÉNICOS EN ARRECIFES CORALINOS
DEL CARIBE MEXICANO
PROYECTO AJ-009
INFORME FINAL

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento contiene los resultados obtenidos a partir de un programa interdisciplinario para implementar acciones coordinadas para restaurar arrecifes dañados por encallamiento en el Caribe Mexicano. Las instituciones participantes fueron el Centro Regional de Investigación Pesquera Puerto Morelos del INAPESCA (CRIP), el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc de la CONANP (CONANP), la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (UNAM), El Colegio de la Frontera Sur – Chetumal (ECUSUR) y el Acuario de XCARET (XCARET).

Se trabajó de manera interdisciplinaria para la restauración activa de 2 áreas arrecifales afectadas por encallamiento: Arrecife Cuevones en Punta Cancún y Arrecife Manchones en Isla Mujeres, ambos dentro del ANP PNCOIMPCP. Asociado al proyecto se estableció un vivero de coral modular, manteniendo lotes de producción tanto en sistemas de acuario como en sistemas marinos. Se trabajó en definir una estrategia de manejo para reclutas sexuales y se evaluaron los procesos de sucesión asociados a las acciones de restauración.

Ambos arrecifes sufrieron daño por impacto de embarcaciones, perdiendo gran parte de su cobertura coralina y ocasionando daño a la estructura de carbonato de calcio, sin mostrar una recuperación natural satisfactoria después de varios años. En el caso de Arrecife Cuevones el accidente ocurrió el 17 de diciembre de 1997 cuando la embarcación noruega tipo crucero “Leward” impacto el arrecife coralino afectando un área total de 480m², causando la fragmentación, abrasión y aplastamiento de diversas formas de vida marina componentes del arrecife coralino, entre ellas varias colonias de coral de gran tamaño del género *Acropora*; por otra parte, el impacto también ocasionó una fractura a la estructura geológica. Antes del accidente la unidad arrecifal era una zona turística donde se realizaba buceo SCUBA, en donde se había estimado una cobertura coralina del 14% de tejido vivo. Después del impacto, la cobertura coralina se redujo al 1% y se decidió cerrar el sitio al turismo de manera indefinida como una estrategia de manejo y conservación para disminuir los impactos antrópicos y promover la pronta recuperación del arrecife. En Arrecife Manchones el accidente ocurrió durante el mes de septiembre de 2002 por el encallamiento de una embarcación pesquera tipo camaronero impactando 438 m², reduciendo la cobertura coralina en un 40%, siendo *Acropora palmata* la especie más afectada. En este sitio aún se realizan actividades turísticas. Al inicio del proyecto en el año 2012, en ambos sitios se observó que la recuperación natural que había ocurrido hasta ese momento no había permitido restituir la estructura y la función que fueron alteradas, teniendo sitios con baja cobertura coralina y una composición de especies de coral con marcada ausencia de constructores arrecifales y alta cobertura de algas.

De esta manera a través de este proyecto se trabajó de manera interinstitucional para implementar acciones de restauración en estas 2 áreas arrecifales y consolidar el establecimiento de un vivero de corales en el Caribe mexicano para sustentar la siembra

de corales. De manera sinérgica se realizaron diferentes experimentos para determinar una estrategia de manejo de reclutas sexuales de *Acropora palmata* producidos en laboratorio para incrementar su sobrevivencia y evaluar la efectividad de su introducción al medio natural; así como para determinar los patrones de sucesión secundaria en los sitios de restauración en comparación con sitios sin intervención y sitios no afectados por encallamiento.

Las actividades del proyecto se llevaron a cabo de junio del 2012 a octubre del 2016, durante 8 etapas semestrales. Estas actividades se dividieron en los siguientes temas: Marcaje de las áreas de restauración y de las áreas para evaluación sucesional; acciones de restauración a través de la siembra de corales; producción de colonias en sistemas de acuario; producción de colonias en sistemas marinos; análisis de patrones de sucesión; y producción de colonias por reproducción sexual. 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.

Marcaje

El marcaje permanente de las áreas de restauración se llevó a cabo al inicio del proyecto, delimitando 357 m² para Arrecife Cuevones y 350m² para Arrecife Manchones. Este marcaje sirvió de referencia para el levantamiento de los fotocuadrantes para el seguimiento del área intervenida de manera semestral. En ambos sitios, el área se dividió en 5 cuadrantes de 10 x 7 m cada uno (A-E). Antes de iniciar las acciones de restauración se llevó a cabo una caracterización de los sitios, analizando la cobertura de biota sésil, así como la estructura comunitaria de peces. El marcaje para la evaluación de los procesos sucesionales consistió en marcar 80 cuadros permanentes de 1m² (40 en la zona de impacto y 40 en la zona de referencia), los cuales sirvieron de referencia para el monitoreo que se llevó a cabo a lo largo del proyecto.

Restauración

Siembras:

Las actividades de restauración consistieron en 1 siembra inicial de 300 colonias de coral en cada uno de los sitios de restaruación, para lo cual se utilizó un lote de colonias que se produjeron en el vivero de coral de la CONANP previo al inicio del proyecto. Posteriormente se realizaron 5 siembras subsecuentes con las colonias producidas en el vivero que se instaló como parte del proyecto; realizando la siembra de aproximadamente 180 colonias de 6 diferentes especies por sitio entre las etapas 3^a y 7^a del proyecto. Se llevaron a cabo 9 registros dentro del programa de monitoreo que se implementó para evaluar la sobrevivencia y crecimiento de las colonias fijadas.

Sobrevivencia:

En Arrecife Cuevones se realizó la siembra de 4 especies de coral. Se inició con *Acropora cervicornis*, teniendo muy buena sobrevivencia durante los primeros 7 registros, con una

tasa de sobrevivencia superior al 90%; pero en los 2 últimos registros (año 2016) se estimó una reducción en la sobrevivencia. En cambio, *Acropora palmata*, mantuvo una tasa de crecimiento mayor al 98% en todos los registros. La especie *Orbicella annularis* mostró una tasa de sobrevivencia superior al 90%, aunque se aprecia una tendencia a disminuir con el tiempo. En el caso de *Montastraea cavernosa*, la sobrevivencia fue prácticamente del 100%, a excepción del último registro en donde se detectó una disminución al 98%.

En Arrecife Manchones se realizó la siembra de 6 especies de coral. Para el caso de *Acropora cervicornis* y *A. palmata*, la situación es similar que para Arrecife Cuevones. La siembra en este sitio también se inició con *Acropora cervicornis*, teniendo muy buena sobrevivencia durante los primeros 7 registros, teniendo una tasa de sobrevivencia superior al 90%; pero en los 2 últimos registros (año 2016) se estimó una reducción en la sobrevivencia. La especie *Acropora palmata*, mantuvo una tasa de sobrevivencia mayor al 95% en todos los registros. Las especies *Orbicella annularis* y *Montastraea cavernosa* mostraron una tasa de sobrevivencia del 100%. Para la especie *Porites porites* se tuvo una tasa mayor al 97% hasta el registro 7, y posteriormente se registró un decremento en su sobrevivencia. Para la especie *Undaria tenuifolia* se tuvo una sobrevivencia mayor al 90% hasta el registro 7, y posteriormente se registró un decremento importante, y en los últimos registros ya no se ha podido detectar las colonias marcadas de estas, debido a que se pierden entre el sustrato donde están creciendo.

En ambos casos, cabe resaltar que el número de colonias cuya marca no pueden ser identificadas en campo incrementó en forma paulatina a lo largo de los registros, ya que las marcas se perdieron, se incorporaron al sustrato, o eran ilegibles; y algunas veces hasta se observó el crecimiento de la colonia sobre las marcas. Esto es una situación normal, por el paso del tiempo y el efecto sobre las marcas.

Crecimiento:

En cuanto al crecimiento, en Arrecife Cuevones se observa un crecimiento gradual en el tamaño de las colonias fijadas y marcadas en el área de restauración de Arrecife Cuevones. En el caso de la especie *Acropora cervicornis*, el tamaño promedio de la muestra incluye a las colonias que se sembraron en esa etapa, más las que se habían sembrado en etapas anteriores. Por ello, el incremento entre etapas a veces no es muy notorio, ya que las nuevas colonias sembradas son de tamaño más pequeño que las colonias ya existentes en el área. Sin embargo se logra ver un incremento paulatino, de casi 1 cm por etapa. El caso de *A. palmata* la altura promedio muestra un incremento más notorio y gradual, teniendo una desviación estándar más grande en cada etapa, debido a la diferencia de tamaños entre las colonias recién sembradas y las que se sembraron en etapas anteriores.; teniendo un incremento de casi 4 cm en la altura promedio de estas especies durante 4 eventos de medición. Para las especies *Montastraea cavernosa* y *Orbicella annularis* se registraron variaciones entre las etapas, sobre todo por la muestra de colonias que se midieron en cada caso, que no fue siempre la misma.

En Arrecife Manchones la situación es similar que en Cuevones. Las colonias de *Acropora cervicornis* mostraron un crecimiento paulatino hasta abril del 2015, llegando a una altura promedio máxima de 18.5 cm, y a partir de ahí se mantuvo el tamaño de las colonias en un rango de 16 a 18 cm. Esto se debe a que el crecimiento de esta especie, al ser ramificada, no alcanza tallas más grandes, sino que empieza a crecer hacia los lados. *Acropora palmata* también presentó un incremento constante durante los 4 registros.

Montastrea cavernosa y *Orbicella annularis* mostraron variaciones en la altura promedio a lo largo del tiempo, debido también a que la muestra fue diferente en cada ocasión. El tamaño de las colonias de *Porites porites* también fluctuó entre los 6 y 9 cm de alto, debido a que sus colonias en forma digitiforme no alcanza alturas muy grandes, sino que se va extendiendo en el sustrato. Las colonias de *Undaria tenuifolia* mostraron un crecimiento paulatino hasta la fecha en la que se podían reconocer las marcas para su medición.

Registro fotográfico de las áreas restauradas:

El Arrecife Cuevones originalmente presentaba una escasa cobertura coralina siendo ésta dominada el género *Porites*, siendo especies pioneras de crecimiento incrustante que no contribuyen en gran medida a la acreción de la estructura arrecifal. Sin embargo, también se registró la presencia de corales constructores arrecifales como las del género *Acropora*, y en menor medida del género *Montastraea* y *Orbicella*. La restauración en este sitio ha consistido principalmente en incrementar la cobertura de *Acropora cervicornis*, trabajando hasta este momento en los cuadrantes B, C, D y E, incrementando cada vez más su densidad y cobertura. En la siembra anterior se empezó a trabajar con colonias de crecimiento masivo como las del género *Montastraea*, logrando un incremento en su presencia sobre el costado de Sotavento de la estructura. Durante ésta etapa se continuó con la introducción de *Acropora palmata*, principalmente en el cuadro También se continuo incrementando la densidad y cobertura de *A. cervicornis* en los cuadrantes B y D.

En Arrecife Manchones la situación inicial era de una muy baja cobertura coralina, y solamente con presencia del género *Porites*. La restauración en este sitio se ha enfocado básicamente a la siembra de *Acropora cervicornis* en las primeras etapas, debido a que era la especie abundante en este lugar, y a partir de la 4ª etapa se trabajó en la siembra de colonias que forman camas de coral de las especies *Porites porites* y *Undaria agaricites*. Para la 5ª etapa se inició la siembra de colonias de *Acropora palmata* y *Orbicella annularis* en el cuadro A del área de restauración, reforzando además la densidad y cobertura de *Acropora cervicornis* en el cuadro E. En esta 8ª etapa se continuó con la siembra de colonias de *Acropora palmata* en los cuadrantes A y B, y de *Acropora cervicornis* en el cuadro E (Figuras 21b). Durante la séptima y octava etapa se realizaron siembras de *Acropora cervivornis* en los cuadrantes A y B y *Acropora palmata* en los cuadrantes D y E.

Acuarios

Se estableció un Sistema de Cultivo de corales Exterior (SCE) en las instalaciones del CRIP Puerto Morelos compuesto de 8 tinas medianas (1.60 x 0.90 x 0.35) con una capacidad de 460 litros cada una (3,680 litros); además de 4 módulos de cultivo para corales con 1,800 litros de capacidad cada uno (7,200 litros), con una capacidad total de 10,680 litros. Adicionalmente fue necesario hacer una modificación al sistema de suministro de agua marina para lograr una mayor captación de agua, adecuar el techo del SCE, e incrementar la producción de alimento vivo para mantenimiento de los corales.

Se llevaron a cabo rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo de manera cotidiana de acuerdo al protocolo establecido. Se aplicaron esquemas de alimentación a las colonias en cultivo través del suministro de alimento vivo (nauplio de *Artemia* sp. y Rotíferos) combinados con suplementos químicos que se utilizan en acuarismo especiales

para corales. Se llevó a cabo un registro de los parámetros físico-químicos para el control de los cultivos.

Se realizaron 8 eventos de colecta para abastecer los SCE, tanto de sitios del medio natural como del propio vivero de coral marino; así como 8 eventos de producción de fragmentos mediante propapagación clonal, en lotes que variaron entre 180 a 800 colonias de 6 especies de coral, de acuerdo a los procedimientos y técnicas desarrolladas en el proyecto; con una producción total de 2,918 colonias. Del mismo modo se realizaron 8 eventos de exportación de fragmentos producidos del SCE hacia el vivero marino para terminar su crecimiento. Se llevó a cabo un monitoreo a través de 16 registros biométricos de talla y peso de las colonias para estimar la sobrevivencia y crecimiento de los lotes de producción de corales. La sobrevivencia de los fragmentos en un lapso de 6 meses varió entre el 70 y el 97%, a excepción de la segunda etapa en donde se registró una mortalidad masiva debido al incremento de la temperatura de los sistemas por la entrada de agua de la laguna a más de 30°C. En cuanto al crecimiento de las colonias en cultivo se observaron valores variables por semestre, siendo en general valores muy bajos, del orden de 0.3 a 3.49 cm de longitud y entre 1.7 y 5.9 gramos para *Acropora cervicornis*; y de 1.03 cm y 10.56 gr para *Acropora palmata*. Estos valores tan bajos se deben a que después de que se fragmentan las colonias, los 3 primeros meses se genera tejido para recubrir las heridas que se generaron por el corte, y hasta que se termina este proceso empieza un crecimiento apical en las colonias.

Sistemas marinos

Se llevó a cabo la instalación de un Sistema cultivo marino (SCM), compuesto de 50 módulos de concreto, con capacidad para 20, 30 o 36 colonias cada uno, dependiendo del diseño para la especie que se mantendrá en cultivo, con una capacidad total para 1500 colonias de coral. Se llevó a cabo una producción de 8 lotes de colonias de coral, entre 300 y 750 colonias cada uno, considerando 7 especies; con un total de 4,374 colonias producidas. Se realizaron 5 eventos de exportación de fragmentos del SCM hacia los sitios de restauración, además de un evento de exportación de colonias desde el vivero marino de la CONANP hacia los sitios de restauración al inicio del proyecto. El primer evento de exportación fue de un lote de 600 colonias (300 para cada sitio de restauración) y posteriormente de 360 colonias en promedio (180 para cada sitio) Se llevaron a cabo 16 registros biométricos para estimar la sobrevivencia y crecimiento de los corales en cultivo en el SCM.

Sucesión

Se realizó una evaluación del proceso sucesional a escala de parche y a escala de 1m². A la escala de parche se registraron en total 26 especies, 12 de corales pétreos y 14 de corales blandos. *Porites astreoides* fue la especie con mayor abundancia en todos los sectores y su cobertura lineal dominó en los sectores de impacto, R1 y R3. En términos de la cobertura estimada de tejido vivo, *P. astreoides* (0.128m²) dominó en el sector de impacto, *A. palmata* (0.264 m²) en R1, *Orbicella faveolata* (0.321 m²) in R2 y *Millepora complanata* en R3. De las especies clave en la construcción arrecifal *Acropora palmata* sólo estuvo presente en R1 mientras *Acropora cervicornis* estuvo sólo ausente en R2. Se encontraron 32 reclutas pertenecientes a cuatro géneros (Tabla 26). Los reclutas de corales pétreos ocurrieron en menor frecuencia (9 colonias), mientras *Eunicea*, el único

octocoral presente, contribuyó con 23 colonias dominando los sectores R1 a R3. *Porites* dominó en el sector de impacto y *Eunicea* presentó su mayor frecuencia en el sector R3.

Las macroalgas carnosas (MAC) fue el grupo con la mayor abundancia relativa en los sectores, exceptuando R2, donde las calcáreas ramificadas dominaron. Considerando la escala de 1m², *Porites astreoides* fue la especie dominante en todos los muestreos. La cobertura estimada de tejido vivo para esta especie en el sector de impacto osciló entre 775.16 cm² m⁻² en febrero de 2014 y 1011.00 cm² m⁻² en agosto de 2013. Respecto a la abundancia de colonias entre los sitios de impacto sin restauración y referencia no se encontraron diferencias en los cuatro muestreos. En cuanto a la porción de impacto con restauración el efecto de la restauración fue el esperado; un incremento gradual, y significativo para agosto de 2015, en la abundancia como resultado de la introducción de fragmentos. En cuanto a la dominancia en la cobertura estimada de tejido vivo para cada condición *Porites astreoides* fue la especie dominante en el sector de impacto, *Acropora palmata* y *P. astreoides* tuvieron una contribución semejante en el sector de referencia y para el sector de impacto con restauración *P. astreoides* y *A. cervicornis* co-dominaron con un incremento de esta última debido a la introducción de colonias. En cuanto al reclutamiento se encontró un patrón similar entre los 3 sectores, con una mayor presencia de reclutas de *Porites*.

Reproducción sexual

En total se realizaron 89 campañas de seguimiento de eventos de reproducción sexual en seis fechas distintas: en septiembre del 2012, julio y agosto del 2013, en agosto del 2014; y finalmente en agosto y septiembre del 2015, distribuidas en seis sitios, correspondientes a tres especies: *A. palmata*, *O. faveolata* y *D. labyrinthiformis*. El éxito de fertilización de los gametos para los diferentes sitios fue mayor a 90% y en muchas ocasiones llegaba a los 99%. El cultivo de los embriones y larvas se llevó a cabo en tres instalaciones: la UASA de la UNAM, el CRIP-PM de INAPESCA y en el Acuario de Xcaret. Se obtuvieron millones de larvas de *A. palmata* las cuales se asentaron en sustratos artificiales: tapones de cemento y placas de cerámica.

A los reclutas que se produjeron en cada verano, se les dio mantenimiento de manera rutinaria de acuerdo al protocolo establecido por la UNAM. En abril 2014, se trasladaron las reclutas de los desoves de 2011, 2012 y 2013 del vivero terrestre en Xcaret a dos viveros marinos; uno en el PNAPM y el otro en el sitio "Las Ruinas" fuera de Xcaret. El día 4 de febrero del 2015, se transportaron los reclutas sexuales desde el vivero de Xcaret en "Punta Venado", hacia el vivero de corales de la UNAM en Puerto Morelos. El día 11 de febrero se traspasaron 20 reclutas sexuales (10 provenientes del vivero de Xcaret y 10 del vivero de la UNAM, incluyendo reclutas del desove del 2011 y 2012) desde el vivero de corales de la UNAM en Puerto Morelos, hacia el arrecife "Cuevones" en Cancún, con fines de restauración. Se analizó la supervivencia de los reclutas cultivados en acuarios, en el vivero marino y en el arrecife donde algunos reclutas sexuales fueron sembrados finalmente.

En cuanto al monitoreo de sobrevivencia de los reclutas sexuales se observó que tanto en acuarios de XCARET como en los de UNAM los organismos sobrevivieron en un alto porcentaje hasta el mes de diciembre entre 75% y 100%, en enero y febrero se observa un decremento importante en la supervivencia, alcanzando valores menores a 25% en la mayoría de los casos. En las generaciones de reclutas de coral *Acropora palmata* del

2012, 2013 y 2015 es evidente la supervivencia menor al 1% antes de ser ingresados a un vivero marino. La generación 2014 no sobrevivió en ninguno de los sistemas de acuarios y no se ingresaron al vivero marino. La alta mortalidad de reclutas en las diferentes generaciones, fue a consecuencia de un bajo porcentaje de inoculación de los simbiontes, a pesar de los múltiples intentos de inoculación. Para el mantenimiento de los reclutas se construyeron dos viveros marinos: uno ubicado en el sitio Las Ruinas cerca de XCARET y otro en el sitio denominado El Spa dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. La supervivencia es muy alta para reclutas que se mantuvieron por 18 meses en viveros terrestres antes de transferirlos a un vivero marino. Sin embargo, para los reclutas de la Generación 2013 que fueron transferidos a los 8 meses de edad, la mortalidad fue muy alta tanto para los reclutas cultivados en Xcaret como para aquellos cultivados en la UNAM. Para los reclutas de la Generación 2015 el 44 % se transfirieron al vivero marino de la UNAM a una edad muy joven (dos semanas post-asentamiento) para determinar si tomando simbiontes directamente del medio ambiente incrementaba la supervivencia. El 56 % de los reclutas restantes se mantuvieron en los acuarios de UNAM, sin embargo, durante el mes de noviembre tuvieron una mortalidad de un 40% por blanqueamiento del tejido por causas aún desconocidas ya que los parámetros de luz, temperatura y la alimentación fueron normales en este periodo. Por esto se decidió colocarlos en el vivero de Picudas, esperando un porcentaje mayor de supervivencia que en los acuarios ya que se observó un resultado positivo en reclutas de la misma especie y edad correspondientes a otro proyecto. Sin embargo, en los meses posteriores estos corales se perdieron a causa de las fuertes corrientes y las inclemencias climáticas ocurridas entre los meses de febrero y marzo del 2016 y no fue posible recuperar ninguna base con reclutas de esta generación. Debido a que se contaba con reclutas sexuales productos de los desoves del año 2011 que fueron recolectados, cultivados y mantenidos de la misma forma que los reclutas de las generaciones 2012 y 2013, se transfirieron los reclutas a los viveros marinos al mismo tiempo que las otras dos generaciones, teniendo 2.5 años de edad. La supervivencia resultante de esta generación también fue de 100% de las colonias trasplantadas y se observó un crecimiento evidente, igual que la de 2012. El comparativo de las tasas de crecimiento de las reclutas sexuales en el vivero marino versus el arrecife Cuevones muestra que ya sembradas los corales en un ambiente arrecifal tienen tasas de crecimientos mayores a cuando estaban en un vivero marino

Costos de la restauración

Se presenta un ejercicio para evaluar los costos de producción de las colonias, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual, incluyendo todas las actividades para el manejo y mantenimiento de los viveros de coral, las propias acciones de restauración y las actividades de monitoreo que son necesarias llevar a cabo, considerando las capacidades de trabajo adquiridas por el grupo de trabajo al término del proyecto.

Se estima que el costo de producción de un fragmento de coral es de \$319.50 pesos, con base en una producción de 3,920 colonias producidas únicamente en vivero marino. Si se considera una producción mixta, tanto en vivero marino como en acuario, se tiene un costo de \$335.73 pesos por fragmento para un stock de 6,920 colonias. Ahora bien, el costo de una colonia de coral ya sembrada en las áreas de restauración se estimó en \$686.21 pesos, considerando una siembra de 3,600 colonias que provienen de un lote de 3,920 colonias producidas en vivero marino; lo que implica que el 92% de las colonias producidas son sembradas. Si se considera una siembra del mismo número de colonias, pero que provienen de un lote de 6,920 colonias producidas tanto en vivero marino como

en acuario, el costo del fragmento sembrado se estimó en \$983.65 pesos, con la diferencia de que solamente se estaría utilizando el 52% de las colonias producidas para siembra, dejando un stock remanente para reforzar la restauración en la misma área o para extender el área. En cuanto a los reclutas sexuales se estima que el costo de producción, con la metodología empleada por la UNAM y Xcaret, de un recluta de coral es de \$21,253, con base en la producción de 65 colonias producidas únicamente por UNAM y Xcaret y considerando los costos de la infraestructura de los acuarios, incluyendo los sistemas de abasto de agua, filtración y bombeo y los costos de operación de los mismos (gastos de luz, agua, etc). Si se considera una producción sin los costos operativos el costo total es de \$115,000.00, por un costo de \$1,769 por colonias producidas.

Logros del proyecto

Las acciones de restauración activa que se realizaron en el presente estudio sientan un precedente, en cuanto a la visión del grupo de trabajo interdisciplinario para lograr la recuperación de 2 áreas arrecifales que fueron dañadas por encallamiento, dentro de un área natural protegida en el norte de Quintana Roo.

Al inicio del proyecto, en el año 2012, el grupo de trabajo reconoció que la experiencia y conocimiento disponibles en ese momento no eran suficientes para llevar a cabo una restauración de un área arrecifal bajo esquemas de probada eficiencia, como pudiera ser el caso de una reforestación terrestre. Como punto de partida se determinó que la simple práctica de coleccionar fragmentos de coral para propagarlos en el mar es una medida limitada y de corto alcance. Así mismo, se reconoció la necesidad de pasar la etapa de restringirse a atender contingencias ambientales mediante el rescate de colonias, y empezar a construir la capacidad, tanto técnica como de infraestructura, para abordar de una manera más integral y programada el tema de la restauración de arrecifes.

De este modo, las actividades que se realizaron en este estudio consistieron en diferentes procesos de investigación para desarrollar la biotecnología que permitiese producir colonias de coral, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual; para definir los procesos de su manejo en cultivo, tanto en acuarios como en el mar; para mejorar los métodos de siembra de colonias; así como establecer un seguimiento detallado del ecosistema para ir construyendo una estrategia de restauración más robusta. Aunado a este proceso se invirtió en mejorar la infraestructura de los viveros y de los acuarios para mantener un stock de colonias continuamente. Todas estas acciones estuvieron encaminadas a fortalecer las capacidades institucionales para atender el tema de la restauración de arrecifes en México, y poder establecer en el largo plazo un Centro Productor de Coral en el Caribe Mexicano.

La elección de los sitios a restaurar fue uno de los aspectos más importantes que se tomaron en cuenta para el desarrollo del proyecto, con la intención de tener una mayor probabilidad de éxito. Bajo esta perspectiva, se eligieron sitios que habían sido dañados por encallamiento, en donde la recuperación natural no había logrado restituir el daño generado en la estructura y función de los sitios. Otro aspecto relevante fue que la restauración de los sitios se realizó a través de siembras sucesivas a lo largo de los 4 años que duró el proyecto. La restauración activa que se realizó mediante la siembra de colonias de coral en las áreas dañadas, propició la restitución de ciertos atributos, relacionados con la función y la estructura del ecosistema que se intervino. En cuanto a la estructura del ecosistema, la siembra de corales tuvo un efecto directo sobre 2 atributos:

la cobertura coralina y la complejidad estructural. El incremento de cobertura coralina que se logró a través de la siembra de corales fue de 4.8% para Arrecife Cuevones y de 5.4% para Arrecife Manchones, considerando solamente las especies intervenidas. El incremento de cobertura de estas especies representó una ganancia de 1.2 veces la cobertura inicial que existía en Arrecife Cuevones (3.9%) y de 8.9 veces la de Arrecife Manchones (0.6%). 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.

Un resultado relevante que se logró a partir de este programa de restauración activa fue el establecimiento de un vivero de coral modular. Este concepto de modularidad se refiere a que las colonias de coral se producen tanto por vía sexual como asexual; y que se mantienen en diferentes sistemas de cultivo para replicar lotes de producción. La conformación de este vivero permite el traslado de colonias entre los módulos, de acuerdo a sus requerimientos, para finalmente ser introducidas en las áreas de restauración. 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.

Finalmente, se presenta una lista de recomendaciones para acciones de restauración a futuro incluyendo

1. ANTECEDENTES

1.1. Descripción de las condiciones del sitio a restaurar:

El proyecto contempla acciones de restauración activa para 2 sitios que se encuentran dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCPN): Arrecife Cuevones y Arrecife Manchones (Figura 1).

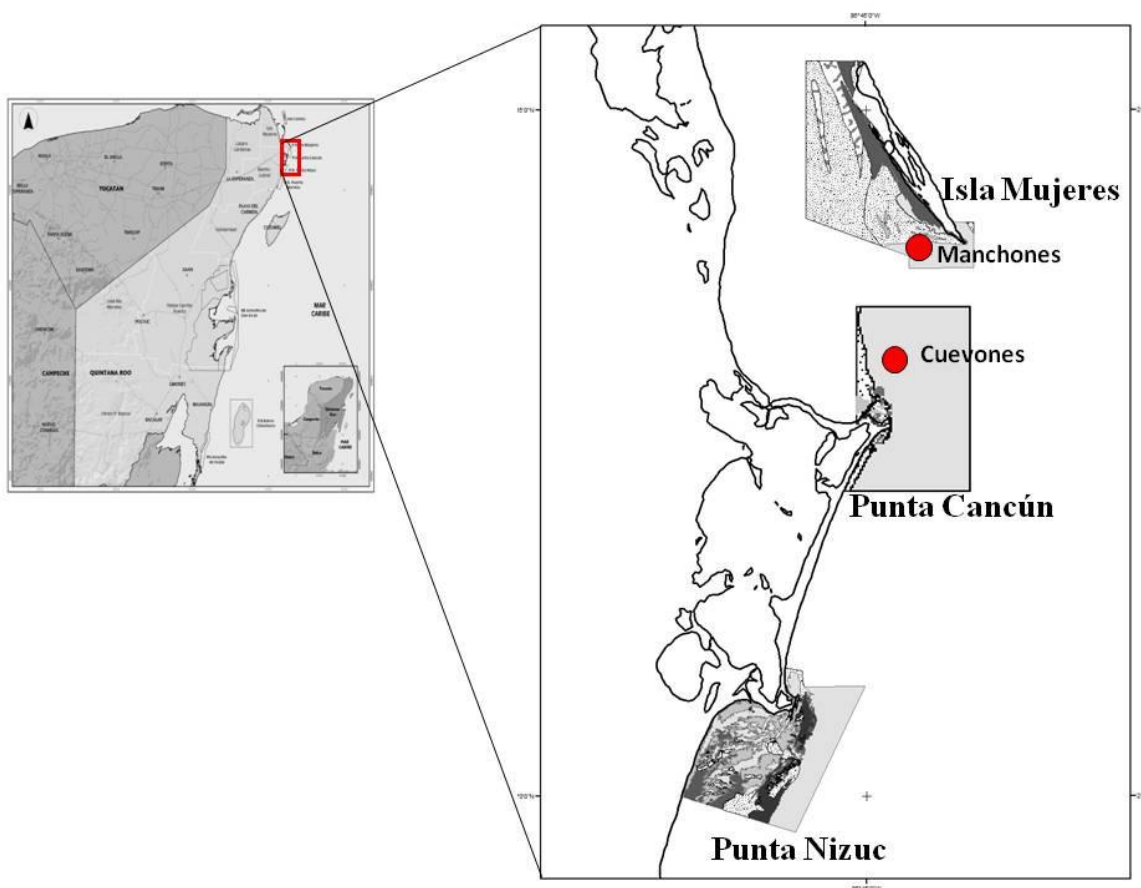


FIGURA 1. Ubicación geográfica de las 2 áreas a restaurar, dentro del ANP Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

1.1.1. Arrecife Cuevones

Se encuentra en el polígono de Punta Cancún, entre las coordenadas geográficas $21^{\circ} 09' 38.40''$ N – $86^{\circ} 44' 26.82''$ W y $21^{\circ} 09' 39.97''$ N – $86^{\circ} 44' 30.03''$ W. Esta estructura arrecifal tiene unas dimensiones de 180 m de largo por 25 m de ancho, siendo un área total aproximada de 4500 m^2 . Se localiza a una profundidad máxima de 10 m; mientras que la parte más somera se encuentra a 5 m de profundidad.

El 17 de diciembre de 1997, la embarcación noruega tipo crucero, Leeward, impactó el macizo arrecifal denominado "Cuevones", afectando un área total de 480m², causando la fragmentación, abrasión y aplastamiento de diversas formas de vida marina componentes del arrecife coralino, entre ellas varias colonias de coral como las pertenecientes al género *Acropora*; por otra parte, el impacto también ocasionó una fractura a la estructura geológica (Figura 2).

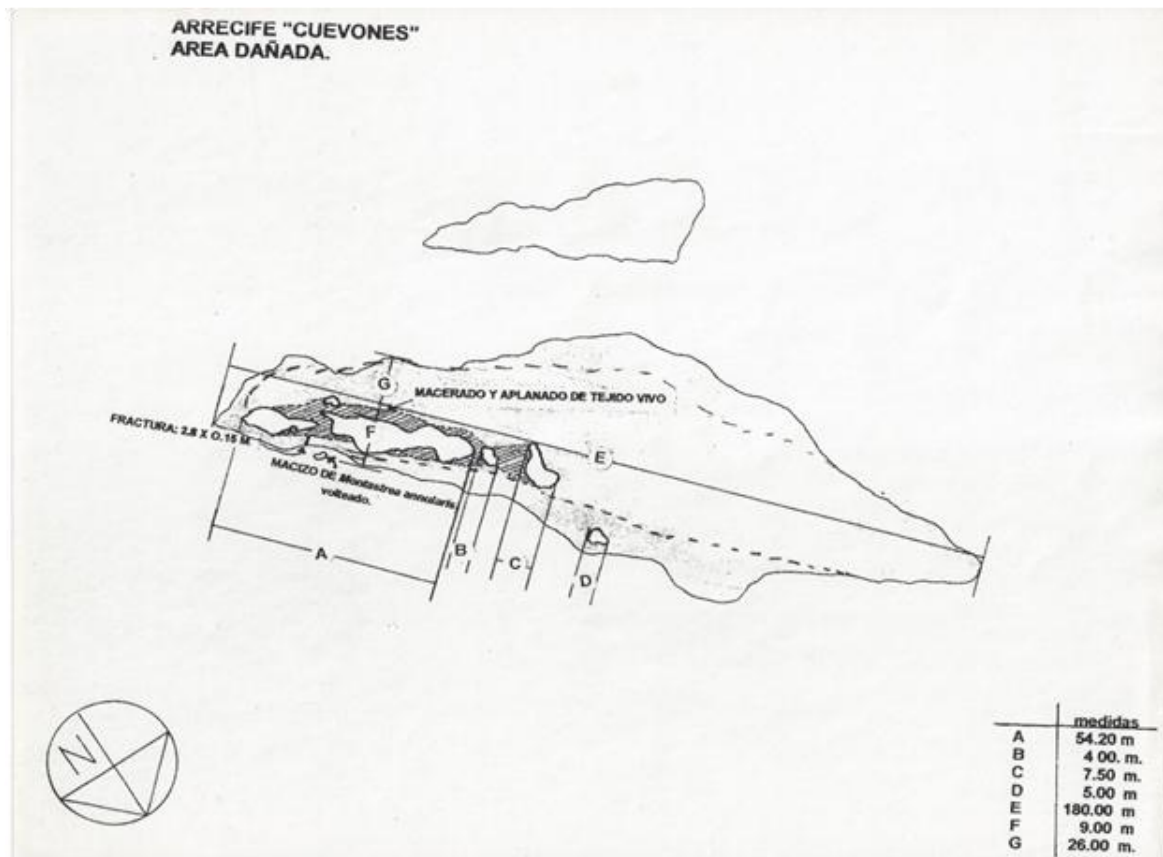


FIGURA 2. Mapa del área dañada en Arrecife Cuevones por el impacto del crucero Leeward. Tomado de reporte interno CONANP "Descripción de la comunidad coralina afectada por el impacto de un barco de gran calado en Arrecife Cuevones, del Polígono de Punta Cancún".

Antes del encallamiento, esta era una zona turística, donde se realizaba buceo Scuba, teniendo una afluencia promedio de 15 turistas diarios; 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*, *Orbicella (=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 3).

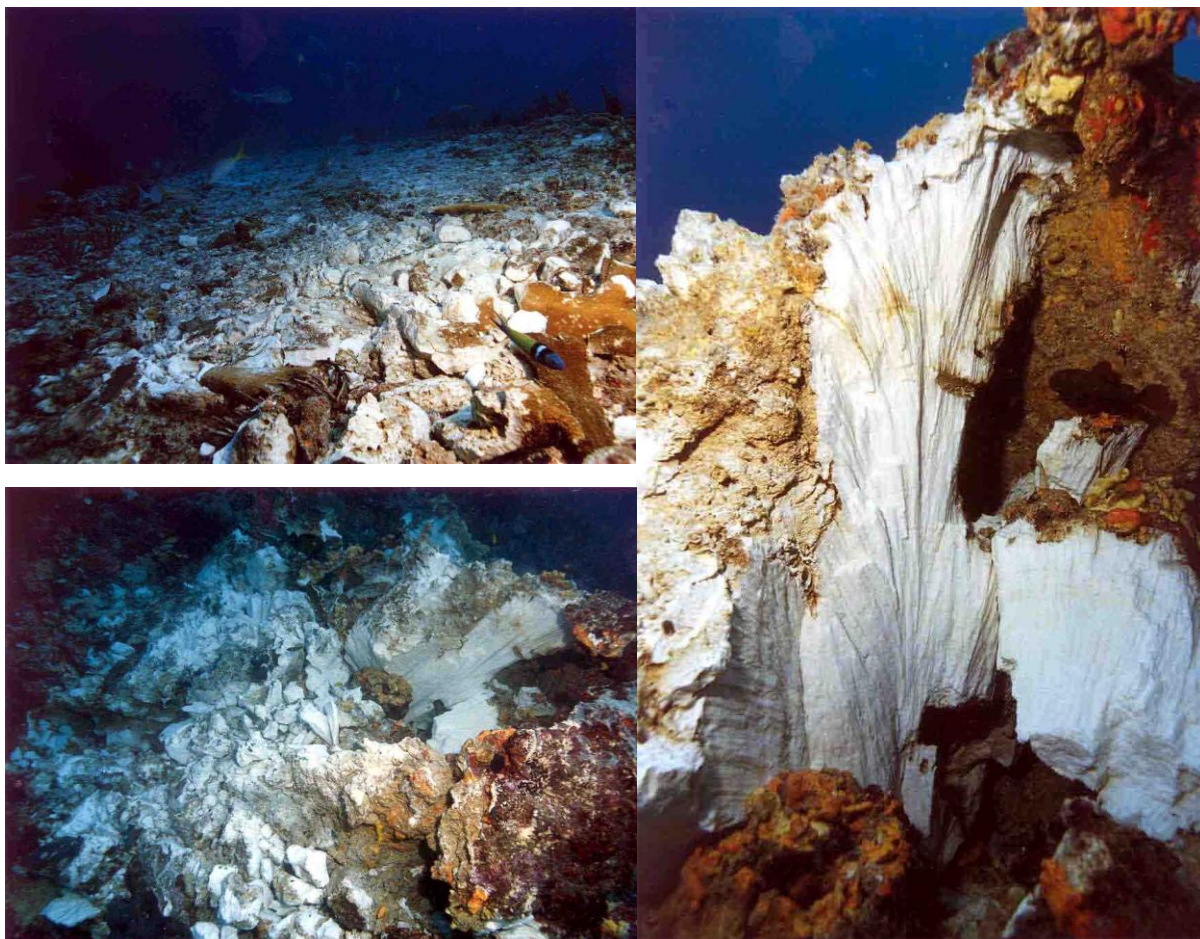


FIGURA 3. Daños ocasionados a la estructura del arrecife Cuevones por el encallamiento del barco Leeward en el año de 1997.

La recuperación de este sitio de manera natural ha sido escasa, ya que 13 años después sólo alcanzó el 4.5% de cobertura. Esta situación advirtió la necesidad de implementar medidas de manejo para promover un proceso de recuperación, sobre todo porque el sitio presenta características favorables para llevar a cabo acciones de restauración. Entre ellas su cercanía a la costa, el manejo del área que prohíbe actividades turísticas, prácticas previas de trasplantes de coral en donde se han tenido resultados alentadores, y la instalación de placas de concreto con fragmentos de coral que registraron una sobrevivencia superior al 90% durante 1 año de cultivo.

1.1.2. Arrecife Manchones

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 camaronero, 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 (Ordenes Scleractinia y Anthoathecata) pertenecientes a las siguientes especies: *Acropora 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; el tamaño 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).

1.2. Características y funciones del ecosistema que se pretende restaurar.

Desde el año 2001, el área natural protegida cuenta con el estudio denominado "Hidrología y calidad del agua del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, Quintana Roo" en el cual se toman datos sobre variables físicas y químicas tales como: salinidad, temperatura, transparencia y fluorescencia, adicionalmente se toman muestras de agua para conocer las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos y clorofila -a. Con esta información se evalúa el estado trófico de cada uno de los polígonos del Parque. En el último reporte emitido por el CINVESTAV, unidad Mérida, en abril 2010, se establece que, en las estaciones de muestreo marinas, el 64.19% presentaron una condición buena, 29.63% una condición trófica regular y un 6.18% una condición mala. El sitio elegido para instalar el vivero de coral corresponde con la estación de muestreo #14 en el polígono de Isla Mujeres, la cual en los últimos 11 años ha tenido una condición trófica buena con excepción del año 2005 cuando impactó el huracán Wilma. En el mismo reporte se muestra que la condición trófica de la unidad arrecifal Manchones ha sido buena en los últimos 11 años, la estación de muestreo es la #13. En el caso de Cuevones, en reporte emitido por CINVESTAV su punto de muestreo es la estación 18, que también ha presentado una condición trófica buena en los últimos 11 años con excepción del año 2004 que presentó una condición regular (Herrera-Silveira, 2010).

La restauración activa que se pretende llevar a cabo en arrecife Cuevones y en arrecife Manchones tiene la intención de incrementar de manera directa la abundancia y cobertura de corales escleractinios. Estas características de la comunidad biótica a su vez están directamente relacionadas con la complejidad estructural (topografía tridimensional) de estos ecosistemas, lo cual generará hábitat para muchos otros organismos, propiciando así un incremento gradual de la biodiversidad.

Cuando ocurre un disturbio en un arrecife coralino, particularmente uno humano como son los encallamientos, justamente las características que se alteran son la abundancia de corales y la topografía del sustrato, de tal modo que los esfuerzos de restauración van dirigidos a restituir esta complejidad estructural a través de la fijación de fragmentos de coral, cuya sobrevivencia y crecimiento en el mediano y largo plazo, favorecerá la formación de hábitat secundario, así como la propia acreción de la estructura arrecifal.

Por otro lado, el presente proyecto contempla también acciones que puedan repercutir a largo plazo, como son mejorar la técnica de producción de reclutas sexuales, con la intención de poder utilizarlos para restauración una vez que se haya probado su viabilidad en el medio natural, lo cual permitirá incrementar la variabilidad genética de las poblaciones de corales, con la intención de favorecer su adaptación evolutiva. Por otro lado, se contempla lograr un mejor entendimiento de los componentes funcionales que determinan los procesos sucesionales de estos ecosistemas como son la herbivoría, el reclutamiento coralino y el crecimiento algal, con la intención de adoptar medidas de manejo tendientes a optimizar una estrategia de restauración que facilite el restablecimiento del patrón de dominancia coralina, siendo este el estado deseable para mantener los servicios ambientales que brindan los ecosistemas arrecifales.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Consolidar la cooperación conjunta de diversas instituciones para implementar acciones de restauración en arrecifes del Caribe mexicano, y reforzar las actividades encaminadas al establecimiento de un vivero de coral para la producción de material vivo.

2.2. Particulares

- Restaurar dos áreas de 300 m² cada una, dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, afectadas por encallamiento de embarcaciones.
- Consolidar el establecimiento de un vivero de corales en el Caribe mexicano que cuente con una producción de colonias de coral para sustentar acciones de restauración de arrecifes de la región.
- Determinar experimentalmente una estrategia de manejo de reclutas sexuales de *Acropora palmata* producidos en laboratorio para incrementar su sobrevivencia, y evaluar la efectividad de su introducción al medio natural como parte de las acciones de restauración.
- Comparar el resultado de las acciones de restauración activa en un arrecife con uso turístico vs. arrecife sin uso turístico.
- Determinar y comparar los patrones de sucesión secundaria para un sitio con zonas sujetas a restauración activa, uno sin restauración y otro no afectado por encallamiento.

3. MÉTODOS

En esta sección se describen los métodos que se emplearon para las actividades que se llevaron a cabo durante el proyecto. El proyecto tuvo una duración de 4 años, dividido en 8 etapas, en los periodos que se señalan a continuación:

Etapa	Fecha de inicio	Fecha de término
1ª	06 de junio 2012	14 de abril 2013
2ª	15 de abril 2013	14 de octubre 2013
3ª	15 de octubre 2013	14 de abril 2014
4ª	15 de abril 2014	14 de octubre 2014
5ª	15 de octubre 2014	14 de abril 2015
6ª	15 de abril 2015	14 de octubre 2015
7ª	15 de octubre 2015	14 de abril 2016
8ª	15 de abril 2016	14 de octubre 2016

3.1. Marcaje

3.1.1. Marcaje permanente de áreas para restauración activa

En la primera etapa del proyecto se trabajó en la delimitación y marcaje del área a restaurar en los 2 arrecifes. Cuevones y Manchones. Para ello se llevaron a cabo varias salidas al campo para reconocer el sitio y delimitar el área que había sido impactada por el encallamiento, y dentro de esa área delimitar la zona que se destinaría para los trabajos de restauración.

Se realizó un marcaje preliminar para delimitar el área, para lo cual se colocaron boyas y se hicieron mediciones con la finalidad de ajustar el área que se destinará para la restauración. Posteriormente se instalaron las marcas definitivas mediante alcayatas de varilla enterradas en el suelo marino y cubiertas posteriormente con un tubo de PVC relleno de cemento, y de este modo se concluyó con el marcaje permanente de las zonas (Figura 4).

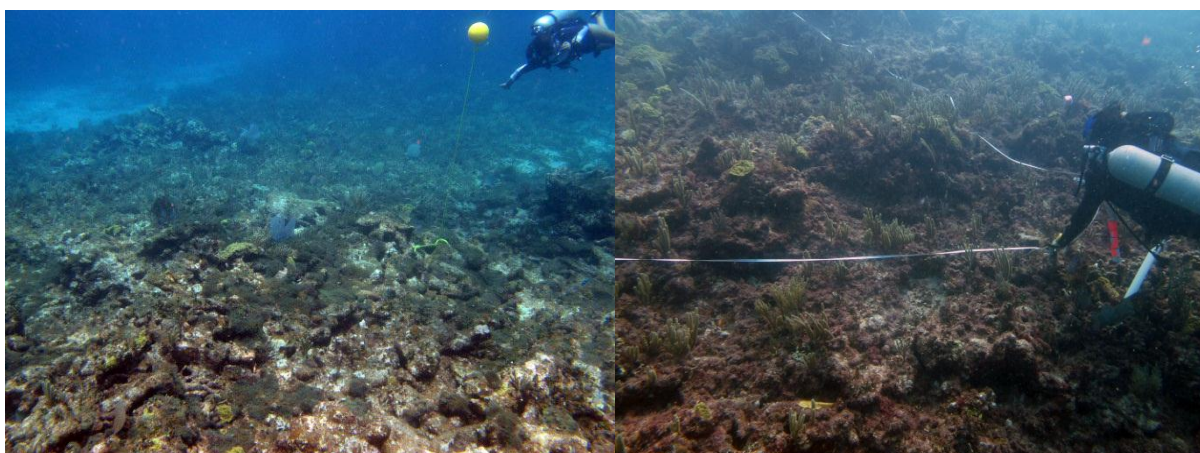


FIGURA 4. Marcaje preliminar del área destinada para restauración. Colocación de boyas (izq.) y medición del área (der.).

Sin embargo durante la 3ª etapa, en los meses de enero y febrero del 2014, se realizó un cambio de los postes de marca permanente de ambos sitios de restauración activa. Esta

actividad fue necesaria debido a que las marcas anteriores resultaron ser muy pequeñas y no eran suficientemente visibles; además de que algunas de ellas se desprendieron y se perdieron (Figura 5).

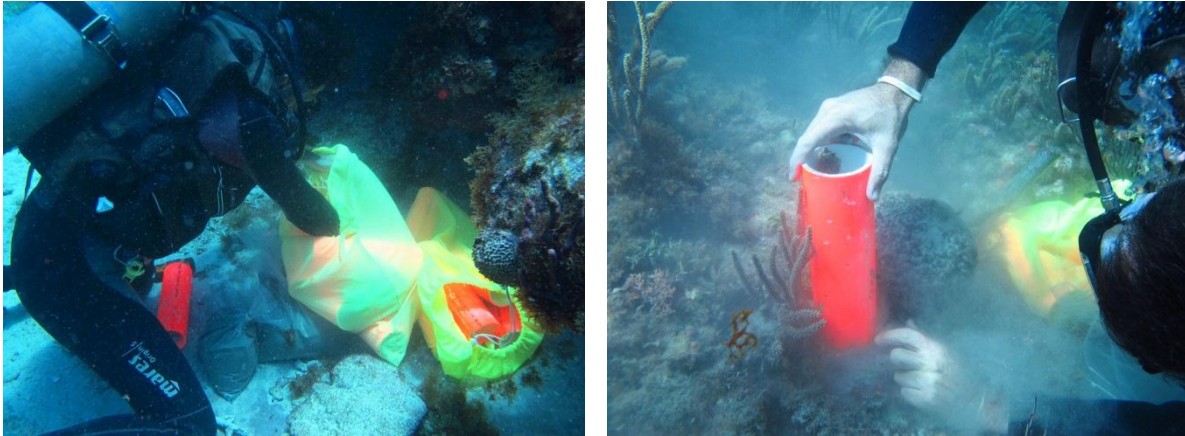


FIGURA 5. Colocación de un nuevo sistema de marcaje permanente en las áreas de restauración en Arrecife Cuevones y en Arrecife Manchones.

3.1.2. Marcaje permanente de área para evaluación sucesional

Para la evaluación de los procesos sucesionales se marcaron de manera permanente el área afectada por el encallamiento sin restauración y una zona no afectada por el encallamiento contigua a la de impacto. Se marcaron 80 cuadros permanentes de 1 m² (40 en la zona de impacto y 40 en la zona de referencia) utilizando varillas de acero inoxidable según lo sugerido por Jokiel *et al.* (2006). Para cada cuadro se utilizaron dos varillas en la diagonal N-S de cada cuadro. El trabajo de marcaje se inició en marzo de 2011 y se continuó hasta agosto de 2012. Para el marcaje, se utilizaron varillas de acero inoxidable tipo 316 de 3/8' de diámetro. Para cada cuadro se utilizaron dos varillas y éstas fueron colocadas en la diagonal N-S (Figura 6).

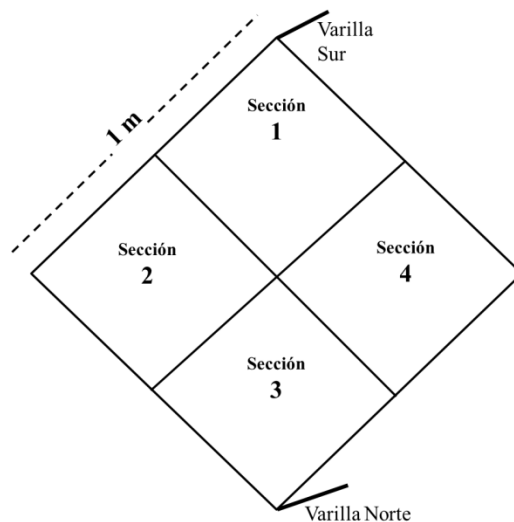


FIGURA 6. Diagrama de los cuadros de 1 m² y las secciones propuestas. La vista corresponde a la que tienen los colectores en el sitio.

Para colocar las varillas fue necesario hacer perforaciones, de 30 cm de profundidad, en la matriz arrecifal y del mismo diámetro de la varilla. Las perforaciones fueron hechas utilizando un taladro neumático conectado a una compresora en la superficie. Se tuvo cuidado de que las perforaciones no fueran hechas sobre colonias de coral vivas y que durante la manipulación del material éstas no se fracturarán. Debido a las condiciones de corriente los cuadros tuvieron que ser colocados con una distribución sistemática en el parche arrecifal Cuevones (Figura 7).



FIGURA 7. Proceso de perforación para la colocación de varillas.

3.1.3. Caracterización de áreas a restaurar

En la primera etapa del proyecto se llevó a cabo la caracterización biológica de los sitios a restaurar previo a las actividades de trasplante, con la intención de conocer la condición inicial en la que se encuentran. Para esta caracterización se consideraron como parámetros comunitarios de referencia la distribución y abundancia de 3 grupos taxonómicos: Corales, algas y peces.

Los corales y las algas son organismos sésiles, por lo que su caracterización se realizó mediante un levantamiento fotográfico para estimar su distribución y abundancia; realizando la toma de fotografías por cuadros de 1 m² en toda el área. Para este registro fotográfico se diseñó y construyó una base de PVC para montar la cámara, con un cuadrante de 1 m² en la base, la cual sirve de referencia de área en la fotografía (Figura 8).

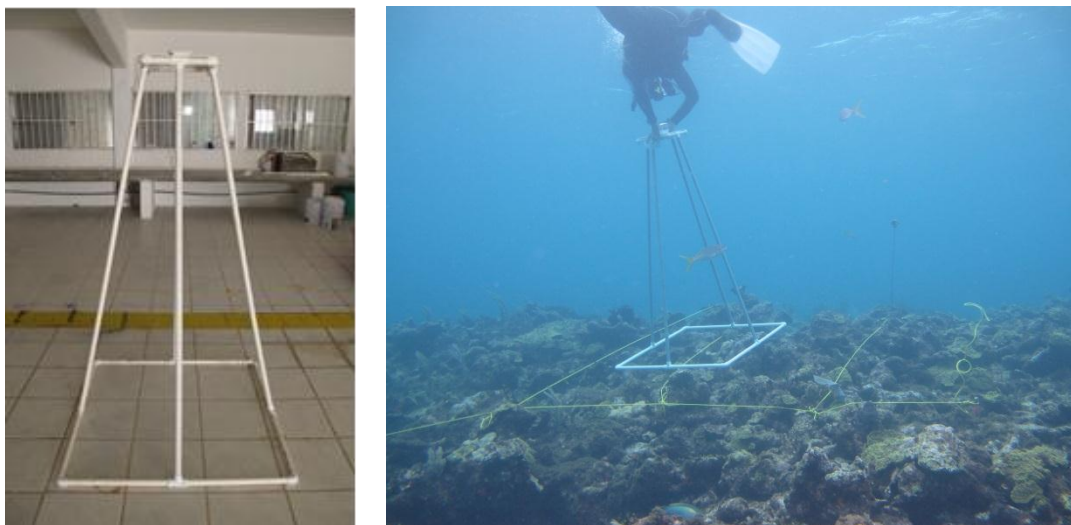


FIGURA 8. Caracterización de las áreas a restaurar mediante la toma de fotocadrantes. Diseño del fotocadrante (izq.) y toma de fotografía submarina (der.)

Posteriormente, se revisaron las fotografías en una proyección, colocando una cuadrícula de 10 x 10 sobre la imagen, para estimar el porcentaje de cobertura coralina y algal, considerando para ello las siguientes categorías (Tabla 1).

TABLA 1. Categorías empleadas para estimar la abundancia relativa por grupo taxonómico para la caracterización de organismos sésiles.

Grupo taxonómico	Genero/Especie	Clave
Corales	<i>Porites astreoides</i>	P. ast
	<i>Porites porites</i>	P. por
	<i>Millepora sp.</i>	Mill. sp.
	<i>Acropora cervicornis</i>	A. cer
	<i>Acropora palmata</i>	A. pal.
	<i>Mostrastrea annularis</i>	M. ann
	Otros corales	Otros corales
Macroalgas		Algas
Otros (gorgonaceos, esponjas, arena, roca)		Varios

El análisis se presenta como una estimación del porcentaje de cobertura que abarca cada grupo taxonómico en ambos arrecifes, resaltando la cobertura por especie de las principales especies de corales escleractinios.

Por otro lado, la abundancia de peces se estimó a partir de un muestreo por el método de transecto descrito por Almada-Villela *et al.* (2003), para lo cual se definieron 2 transectos por arrecife de 50 metros de largo, uno a cada extremo de la franja del área delimitada para la restauración. En cada transecto se registró el número de organismos por especie presentes a 1 m de distancia a ambos lados de la línea y el tamaño para cada individuo. De este modo se obtuvo un área muestreada por transecto de 100 m² y de 200 m² por arrecife (Figura 9).



FIGURA 9. Muestreo de la comunidad de peces mediante el método del transecto.

Para el análisis de la comunidad de peces se presenta un listado de especies con un estimador de abundancia relativa por especie para cada una de las zonas de muestreo. Este estimador de abundancia relativa se presenta en categorías de acuerdo a la Tabla 2. El tamaño de los organismos se registró en clases de tamaño, de acuerdo a las categorías descritas en la Tabla 2.

TABLA 2. Categorías de abundancia relativa y de estructura de tamaño para la comunidad de peces.

ABUNDANCIA RELATIVA			TAMAÑO	
Categoría	Abreviación	Rango	Clase de talla	Rango
Dominante	D	> 20%	I	< 10 cm
Abundante	A	10-20%	II	10-20 cm
Común	C	5-10%	III	20-30 cm
Escaso	E	1-5%	IV	30-40 cm
Raro	R	< 1%	V	> 40 cm

3.2. Restauración

3.2.1. Eventos de siembra para la restauración activa en 2 sitios

a) Siembra inicial:

Esta actividad consistió en la siembra de un lote colonias que existían en el vivero de coral previo al inicio de este proyecto, trasplantando 300 colonias en cada uno de los sitios de restauración; lo cual se llevó a cabo al final de la 2ª etapa del proyecto,

b) Siembras subsecuentes:

El programa de restauración consistió en 5 eventos de siembras semestrales con colonias producidas en el proyecto, en cada uno de los 2 sitios. Esta actividad inicio a partir de la 3ª etapa del proyecto y se realizó la última siembra en la 7ª etapa.

El primer evento de siembra se realizó en la 3ª etapa del proyecto, con el trasplante de 180 colonias en cada uno de los sitios de restauración. En la 4ª etapa se realizó el segundo evento de siembra subsecuente, con 101 colonias en arrecife Cuevones, y 313 colonias en arrecife Manchones. En la 5ª etapa se realizó el tercer evento de siembra subsecuente, con 192 colonias en Cuevones y 207 en Manchones. En esta 6ª etapa se realizó el cuarto evento de siembra subsecuente, con 180 colonias en Cuevones y 180 colonias en Manchones. En la 7ª etapa se realizó el quinto evento de siembra subsecuente, con 188 colonias en Cuevones, y 186 colonias en Manchones.

c) Marcaje de colonias

En total se trabajaron 6 eventos de siembra en cada uno de los sitios de restauración durante todo el proyecto. En cada evento de siembra se llevó a cabo el marcaje de aproximadamente el 30% de las colonias que fueron fijadas en cada siembra, incluyendo todas las especies de coral que se produjeron en el proyecto (Tabla 3 y Figura 10).

TABLA 3. Marcaje de colonias sembradas en área de restauración durante los diferentes eventos de siembra.

Etapa	Fecha	Arrecife	Colonias sembradas	Colonias marcadas	Serie
2a	oct-13	Cuevones	300	100 (30%)	001-100 Acer
	sep-13	Manchones	300	100 (30%)	100-100 Acer
3a	may-14	Cuevones	180	100 (55%)	100-200 Acer
	mar-14	Manchones	180	100(55%)	100-200 Acer
4a	ago-14	Cuevones	101	30 (30%)	201-230 Mcav/Oann
	jul/ago-14	Manchones	313	70 (23%)	201-270 Ppor/Uaga
5a	feb/mar-15	Cuevones	192	60 (31%)	231-290 Apal/Acer
	Mar-15	Manchones	207	54 (26%)	271-324 Apal/Acer
6a	15-jul-15	Cuevones	180	60 (33%)	291-330 Apal 331-350 Acer
	14-jul-15	Manchones	180	66 (36%)	325-370 Apal 371-390 Acer
7a	07-abr-2016	Cuevones	188	60 (32%)	351-380 Apal 381-395 Oann 396-410 Mcav
	08-abr-2016	Manchones	186	60 (33%)	391-420 Apal 421-435 Oann 436-450 Mcav

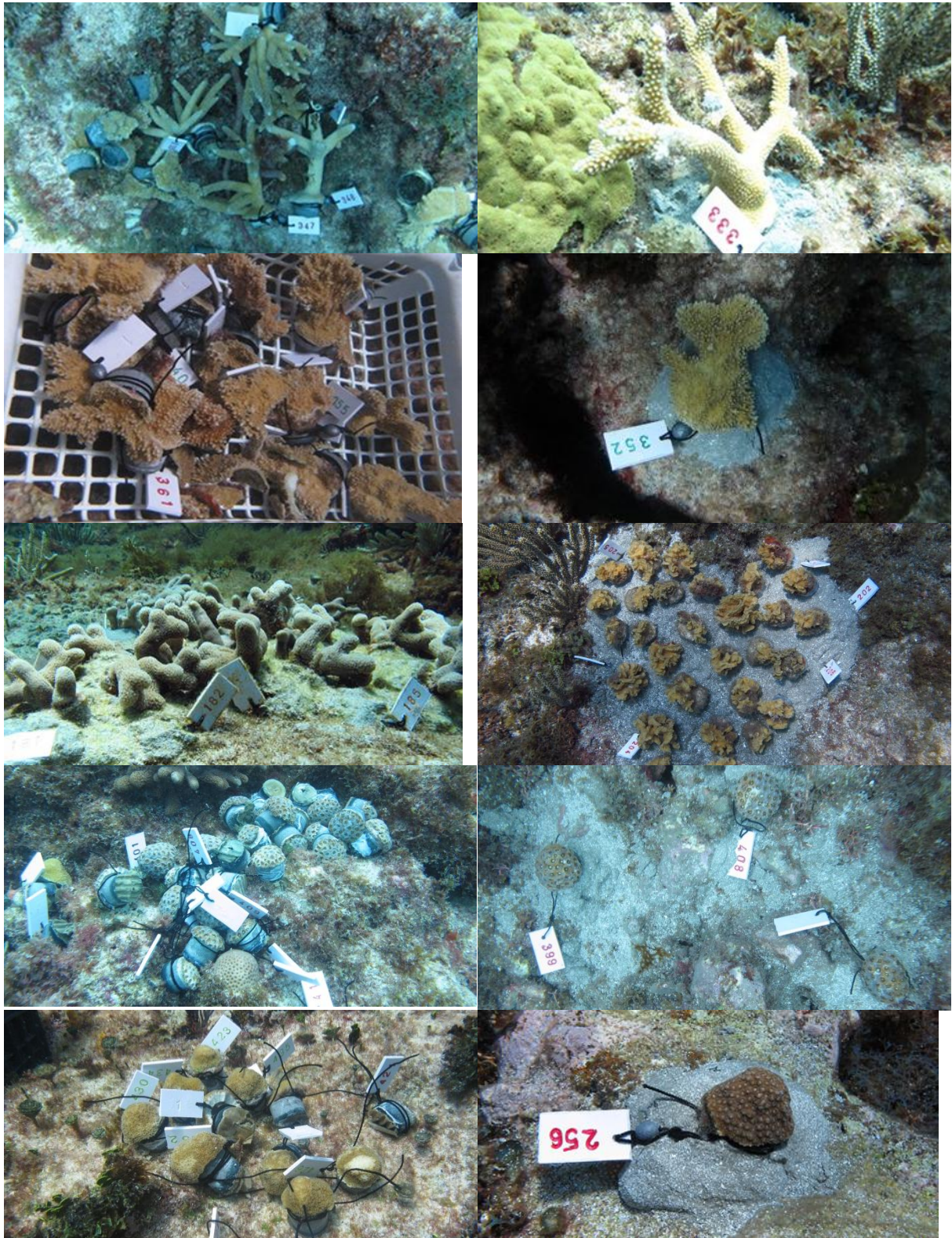


FIGURA 10. Marcaje de colonias para identificación de aproximadamente el 30% de las colonias sembradas para distintas especies: a) *Acropora cervicornis*, *Acropora palmata*, *Porites porites*, *Undaria agaricites*, *Orbicella annularis* y *Montastraea cavernosa*

3.2.2. Procedimiento de siembra

El procedimiento que se empleó para la siembra de corales en los sitios de restauración incluye 4 procesos:

a) Selección de colonias a sembrar:

Las colonias que se utilizaron para siembra en las áreas de restauración provenían del vivero de coral ubicado en Bajo Pepito, Isla Mujeres. Se seleccionaron colonias que tuvieran un crecimiento importante desde su fragmentación, que no presentaran síntomas de alguna enfermedad y que estuvieran completas. Las colonias elegidas se retiran de las placas del vivero desenroscando el conector de PVC y colocándolas en bandejas para su traslado a la embarcación (Figura 11).

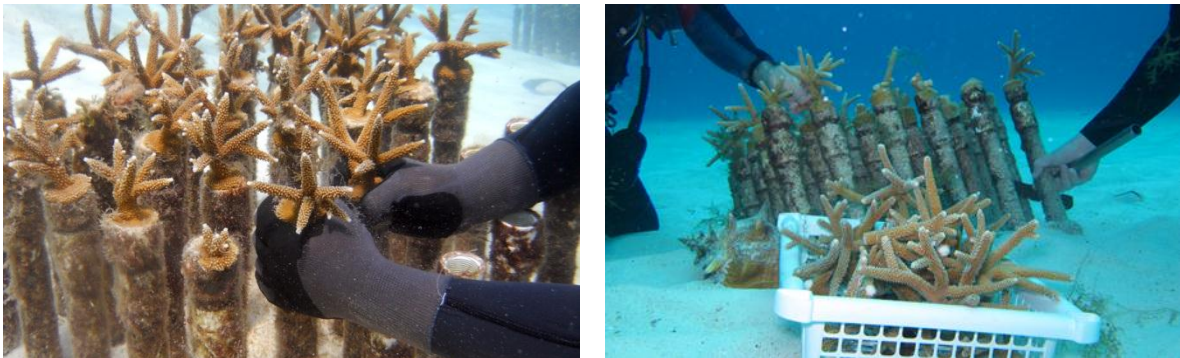


FIGURA 11. Selección y colecta de colonias de *Acropora cervicornis* listas para trasplante. Cada colonia se desatornilla con su conector de PVC (izq)

b) Transporte de colonias:

Las colonias seleccionadas en el vivero, una vez que se colocaron en las bandejas son transportadas a la embarcación y colocadas en hieleras con agua de mar abordo, para ser trasladadas hacia los sitios elegidos para restauración. El tiempo de traslado a los sitios fue de 10 minutos utilizando embarcaciones rápidas (Figura 12).



FIGURA 12. Transporte de colonias para su trasplante en los sitios elegidos para restauración. Las colonias se transportaron dentro de hieleras con agua de mar.

Una vez en los sitios de restauración, las colonias son transportadas en las bandejas y se colocan en el fondo marino en el área de preparación de colonias para siembra (Figura 13).



FIGURA 13. Estación para recepción y separación de colonias de coral en el sitio para y separación de la colonia de coral de su conector de PVC utilizando una herramienta diseñada para tal fin.

c) Preparación de colonias para siembra:

En el área de restauración, se elige un sitio para preparación de las colonias para siembra. En este sitio se trabajan las colonias para separarlas conector de PVC con el que se mantenían en el vivero marino. Para ello se utiliza un aparato diseñado especialmente para aplicar presión por dentro del conector y sacar el tapón de cemento con su colonia de coral. De esta manera la base de concreto de la colonia queda libre, y los conectores de PVC se pueden utilizar nuevamente en el vivero de coral (Figura 14 y 15).

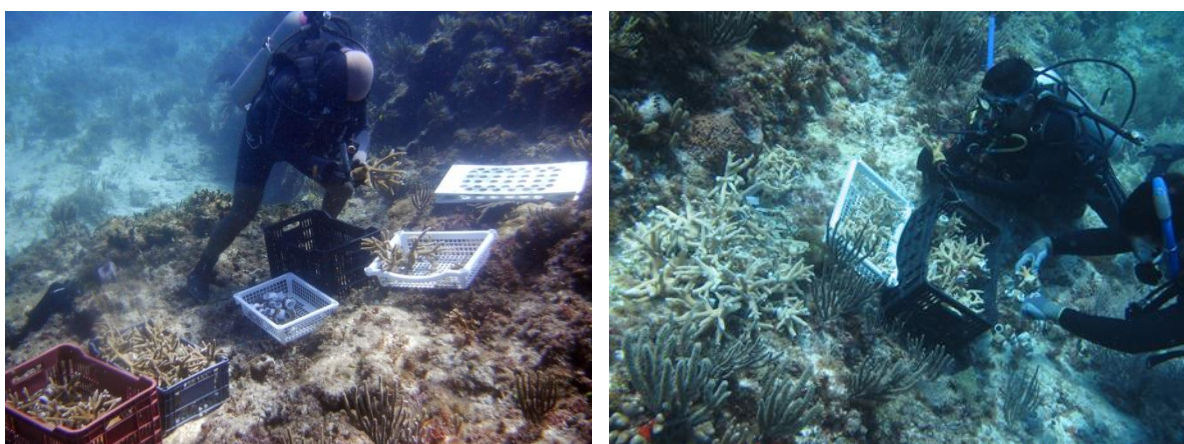




FIGURA 14. Estación para recepción y separación de colonias de coral en el sitio para restauración.



FIGURA 15. Separación de la colonia de coral de su conector de PVC. Se utiliza una herramienta diseñada localmente para cumplir con esta función (der).

d) Fijación de colonias al sustrato marino:

Para fijar las colonias al sustrato marino se aprovecharon las oquedades naturales de los sitios, las cuales fueron rellenadas con cemento. El cemento que se utilizó fue cemento gris “Portland”, mezclado con un poco de arena. Para la preparación del cemento se utiliza poca agua para sumergirlo en bolsas de plástico y que tenga una consistencia pastosa. Una vez que se colocó el cemento en el sustrato, se inserta el tapón con la colonia de coral dentro del cemento y su cubre con un poco más de cemento si es necesario (Figura 16).



FIGURA 16. Buzo transportando el cemento en una bolsa de plástico y colonias listas para ser trasplantadas (izq arriba). Fijación de una colonia de coral al sustrato insertando su tapón dentro de cemento (izq. Abajo). Imagen panorámica con varias colonias de coral de *Acropora cervicornis* recién trasplantadas (der.).

La disposición de las colonias dentro del área de restauración estuvo en función de la especie que se tratara. De este modo, las especies que tienen un crecimiento masivo o ramificado y que forman colonias de gran tamaño se fijaron aisladas y separadas entre sí. En cambio, especies que crecen formando grupos o “camas” se fijaron varias colonias juntas para favorecer su proliferación (Figura 17).





FIGURA 17. Sembrado de colonias de la especie *Orbicella annularis* (arriba izq), *Acropora palmata* (arriba der.), *Undaria (=Agaricia) sp.* y *Porites porites* (abajo der)

3.2.3. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas.

El programa de monitoreo que se estableció para evaluar la sobrevivencia y crecimiento de las colonias de coral sembradas en las áreas de restauración consistió en un total de 9 registros para todo el proyecto. En las primeras etapas los registros se llevaron a cabo de manera trimestral, y a partir de la quinta etapa se autorizó un cambio para realizar el Monitoreo de manera semestral. (Tabla 4).

TABLA 4. Cronología de los registros del Programa de Monitoreos para evaluar las áreas de restauración.

Etapa	Fecha	Monitoreo	Arrecife Cuevones	Arrecife Manchones
3 ^a	06 nov 2013	Monitoreo 0-1		X
	07 nov 2013	Monitoreo 0-1	X	
	06 mar 2014	Monitoreo 2-3		X
	09 abr 2014	Monitoreo 2-3	X	
4 ^a	19 jun 2014	Monitoreo 4		X
	15 may2014	Monitoreo 4	X	
	18 sep 2014	Monitoreo 5		X
	17 sep 2014	Monitoreo 5	X	
5 ^a	01 abr 2015	Monitoreo 6		X
	08 abr 2015	Monitoreo 6	X	
6 ^a	20/21 jul 2015	Monitoreo 7		X
	16 jul 2015	Monitoreo 7	X	
7 ^a	25 abr 2016	Monitoreo 8		X
	26 abr 2016	Monitoreo 8	X	
8 ^a	15/28 jul 2016	Monitoreo 9		X
	14/29 Jul 2016	Monitoreo 9	X	

Para la medición de los corales trasplantados en las áreas de restauración se utilizó un tubo marcado cada 1 cm para realizar la medición de cada colonia, tomando como registro su altura máxima desde su base de fijación (Figura 18).

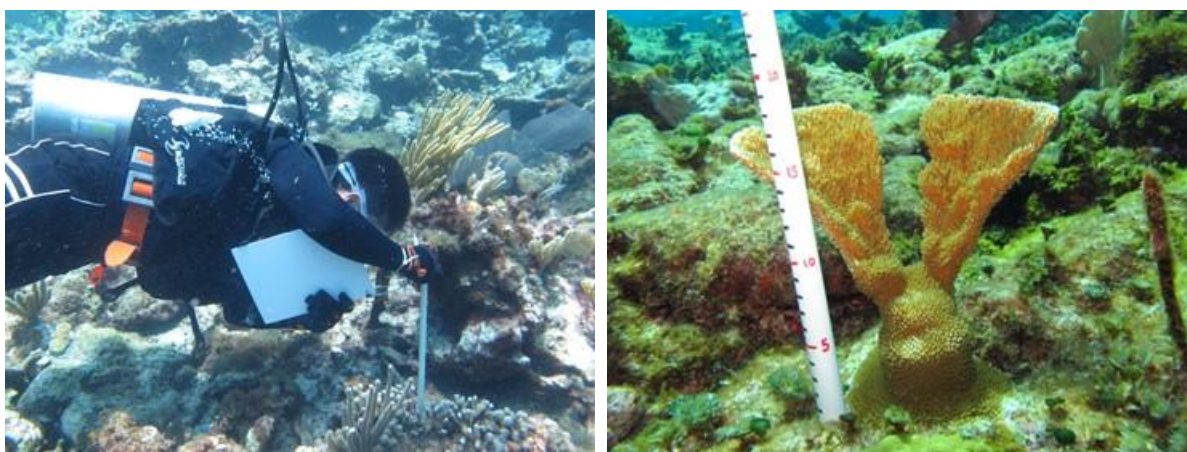


FIGURA 18. Medición de colonias trasplantadas en los sitios de restauración activa para la estimación de sobrevivencia y crecimiento.

3.2.4. Registro fotográfico de áreas restauradas.

Se realizaron 8 registros fotográficos de las áreas restauradas, de acuerdo a lo programado en el proyecto: 7 registros programados, más el registro inicial antes de la siembra que no estaba contemplado en el cronograma (Tabla 5).

TABLA 5. Cronología de los Registros fotográficos para evaluar las áreas de restauración.

Registro fotográfico		Programado	Reportado	Fecha
I	Registro inicial antes de siembra	No programado	1ª. Etapa	Dic 2013
II	Registro después de la siembra inicial: (300 col en cada sitio)	2ª Etapa	3ª. Etapa	Mar-Abr 2014
III	Registro posterior a la 1ª siembra subsecuente (180 col en cada sitio)	3ª Etapa	4ª. Etapa	Jul 2014
IV	Registro posterior a la 2ª siembra subsecuente (101 col en Cuevones / 313 col en Manchones)	4ª Etapa	4ª. Etapa	Sep 2014
V	Registro posterior a la 3ª siembra subsecuente (192 col en Cuevones / 207 col en Manchones)	5ª Etapa	5ª. Etapa	Mar-Abr 2015
VI	Registro posterior a la 4ª siembra subsecuente (180 col en Cuevones / 180 col en Manchones)	6ª Etapa	6ª Etapa	Julio 2015
VII	Registro posterior a la 5ª siembra subsecuente (188 col en Cuevones / 186 col en Manchones)	7ª Etapa	7ª Etapa	Abril 2016
VIII	Registro posterior a la 6ª siembra subsecuente (180 col en Cuevones / 180 col en Manchones)	8ª Etapa	8ª Etapa	Julio 2016

En cada registro fotográfico se obtuvieron 350 fotografías por sitio. Cada fotografía abarca el área de 1m², cubriendo el total de los 350m² que se trabajaron por sitio de restauración (Figura 19). Se realizó el análisis de 350 fotografías por sitio de restauración por registro fotográfico, y se estimaron las coberturas relativas por especie por cuadro, para generar el mosaico de cobertura coralina actual de cada sitio. Este mosaico se compara con el obtenido en la primera etapa durante la fase de caracterización inicial del sitio.

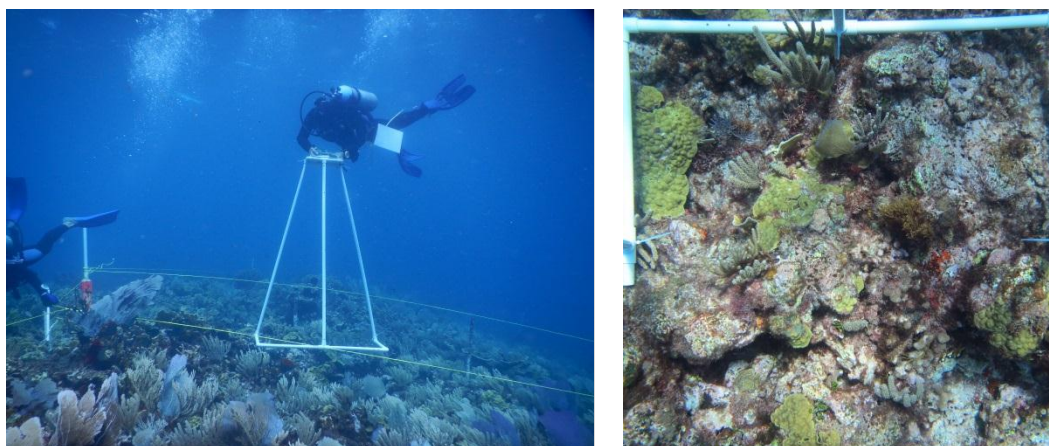


FIGURA 19. Método empleado para el registro fotográfico de fotocuatros. Se observa el marcate y el dispositivo empleado para la toma de fotografías (izq.), así como un ejemplo de una fotografía obtenida para su análisis (der.).

3.3. Acuarios

3.3.1. Instalación de sistemas de cultivo de corales exteriores (SCE)

En la 1ª etapa del proyecto se llevó a cabo la instalación del Sistema de cultivo de corales exterior (SCE), habiéndose concluido al 100%. Los detalles de la instalación se presentan en la sección de resultados.

Se programó instalar 10 sistemas de cultivo a la intemperie con techumbre de policarbonato, con un volumen de 230 litros cada uno, con flujo abierto y recambio total cada 3 horas, iluminación natural y movimiento de agua con aireación por jackets. Al final de la etapa se instalaron 10 sistemas de mayor tamaño, incluyendo 2 sistemas grandes de 1,800 litros cada uno, y 8 medianos de 460 litros cada uno, dando un total de 7,280 litros, lo cual representa más de 3 veces el volumen programado (Figura 20).



FIGURA 20. Adecuación de instalaciones en el CRIP Puerto Morelos del INAPESCA para el establecimiento del Sistema de cultivo de corales exterior (SCE). Antes de iniciar el proyecto (izq.) y al terminar la 1ª etapa (der.).

Adicionalmente fue necesario hacer una modificación al sistema de suministro de agua marina para lograr una mayor captación de agua. En la primera etapa del proyecto se realizó la adecuación del reservorio enterrado con la instalación de una bomba para succión del agua en vez de llenado por gravedad, y durante la 2ª etapa se programa acondicionar un reservorio más grande para almacenaje de agua marina.

Finalmente, como parte de la ampliación de la capacidad de cultivo, fue necesario incrementar la producción de alimento vivo para mantenimiento de los corales. La adecuación que se realizó consistió en rehabilitar los estantes de cultivo en el laboratorio de microalgas, e incrementar los volúmenes de producción (Figura 21).



FIGURA 21. Producción de alimento vivo para cultivo de corales.

3.3.2. Acondicionamiento de sistemas de cultivo controlados

En el CRIP Puerto Morelos se encuentra el módulo del vivero en Acuarios con un sistema de cultivo controlado. Previo al inicio de este proyecto, el área contaba con 4 sistemas de cultivo con flujo cerrado con volumen de 1,800 litros cada uno, control de iluminación artificial, sistema de filtración de agua y simulador de ola. 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 halógenos 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 22).

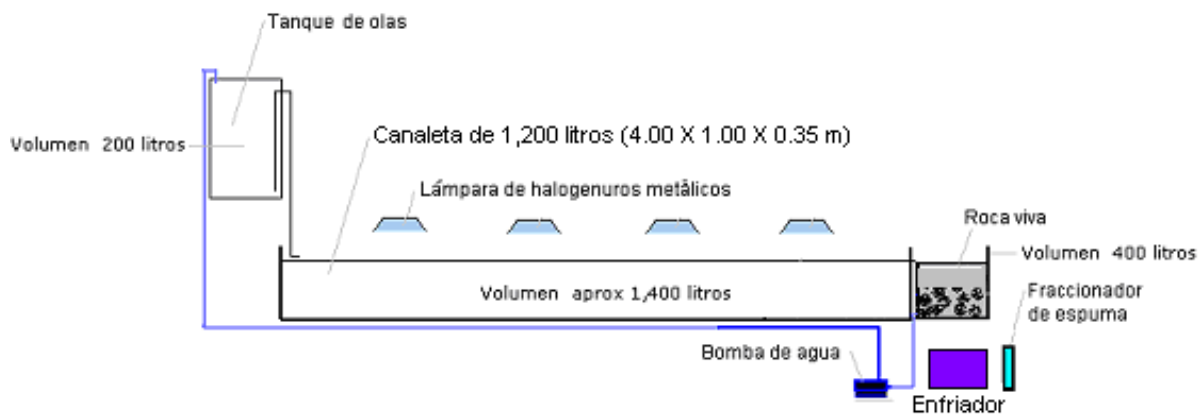


FIGURA 22. Esquema de los sistemas de cultivo controlados (SCC) del vivero de corales en el INAPESCA.

Estos sistemas requirieron del reemplazo de algunas refacciones y equipos para su rehabilitación y mantenimiento, así como de adecuaciones en la configuración del sistema de iluminación, para su mejor funcionamiento.

Durante el proceso de adecuación de las instalaciones se decidió mantener únicamente 2 de estos módulos en el área de acuarios como sistemas controlados, con la intención de maximizar las refacciones y suministros necesarios para su funcionamiento en el período

que dura el proyecto; mientras los otros 2 módulos se transfirieron al área de Sistema de cultivos externos (SCE) en donde se mantienen con luz natural y con flujo de agua abierto con la intención de lograr un ahorro en el consumo de energía y maximizar el volumen del cultivo en esta área.

3.3.3. Rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo

Durante la ejecución de este proyecto se llevaron a cabo las actividades rutinarias de mantenimiento y limpieza de sistemas de cultivo, limpieza de bases, recambios de agua, llenado de reservorios de agua, toma de parámetros físico-químicos y limpieza general del área de cultivo de coral, de acuerdo al protocolo de mantenimiento instaurado para el área de acuicultura del CRIP Puerto Morelos del INAPESCA (Figura 23).



FIGURA 23. Rutina de mantenimiento de sistemas de cultivo. Limpieza de sistemas (izq.) y medición de parámetros (der.).

Adicionalmente se puso a prueba el efecto de peces y caracoles sobre el control de algas, específicamente de las verdes filamentosas, esta prueba busca consolidar un grupo herbívoro que contribuya al mantenimiento del sistema. Las algas verdes filamentosas son el nicho de parásitos ciliados pues se han observado asociadas a los eventos de desprendimiento. Además cuando crecen demasiado entran en contacto con el tejido del coral impidiendo la generación de mucus y/o desgastando el tejido lo que repercute en la salud del coral.

Se llevó a cabo un análisis de la variación de temperatura e intensidad luminosa en los sistemas de cultivo exterior (SCE), a manera de describir su efecto en el crecimiento y sobrevivencia de las colonias en cultivo. El sistema #2 se mantuvo como control y se empleó para poner a prueba dos hipótesis: 1) existe diferencia significativa en temperatura e intensidad luminosa en los sistemas #2 y #8, con sol directo y con sol y sombra respectivamente, para lo cual se empleó durante 37 días el registro de las variables cada 5 minutos con un HOBO pendant® (Figura 24); y 2) al finalizar el tratamiento alimenticio la temperatura es diferente al grupo control, para ello desde el 06/11/15 hasta el 06/04/16 se registró la temperatura mediante HOBO pendant® en el #2 y con un termómetro de laboratorio al inicio y fin de la alimentación con horario diurno en #3 y #8, y con horario nocturno en #5, #6 y #7. Para estimar diferencia significativa se empleó una prueba T student de dos colas con un nivel de confianza del 95%.

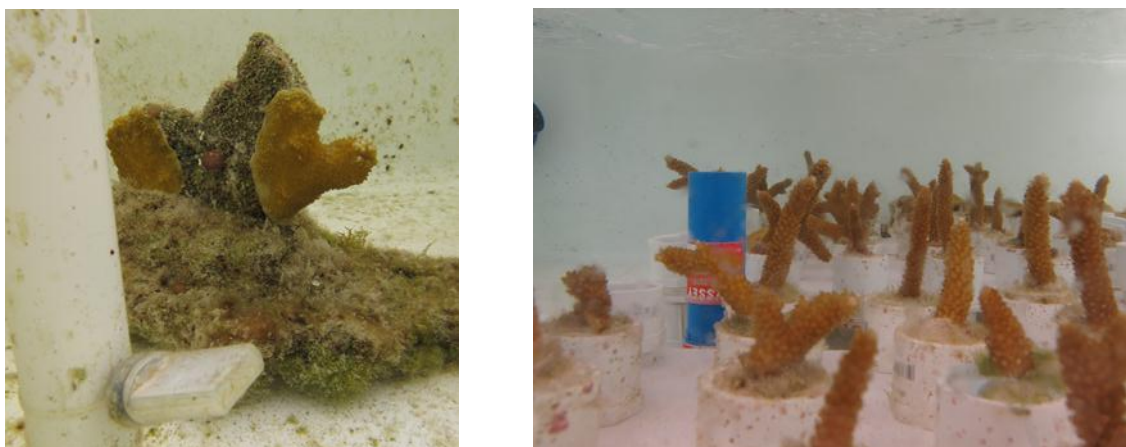


FIGURA 24. Termógrafo (izq.) y Medidor de luz (derecha) en los sistemas de cultivo del SCE.

Se registró la escala Beaufort (Variable oceanográfica para medir la energía del mar basada en la velocidad del viento y oleaje) frente al SCE, en primera instancia solo como dato de referencia para explicar la variación climática puntual, posteriormente se usó para programar la disposición y cambio de filtros.

3.3.4. Colecta de fragmentos de coral

La colecta de fragmentos de coral para abastecer los Sistemas de Cultivo Externo (SCE) se realizó en algunas ocasiones del mismo vivero marino (SCM), y en otras del medio natural, aprovechando los fragmentos de oportunidad. La tabla con la información detallada sobre los sitios por etapa y número de fragmentos por especie se presenta en la sección 4.3.4.

En el vivero marino se colectaron colonias que ya se encontraban de un tamaño adecuado para su fragmentación (Figura 25). En el medio natural se buscaron fragmentos de oportunidad que se encontraban desprendidos y en buenas condiciones para ser fragmentados (Figura 26). Al final del proyecto, también se trabajó con el tejido que recubre el cople de PVC, y que se desprende al momento de retirar la colonia de su base de fijación en el vivero cuando se va a sembrar en el medio natural. Con este tejido se realizó la propagación de colonias por microfragmentación (Figura 27).

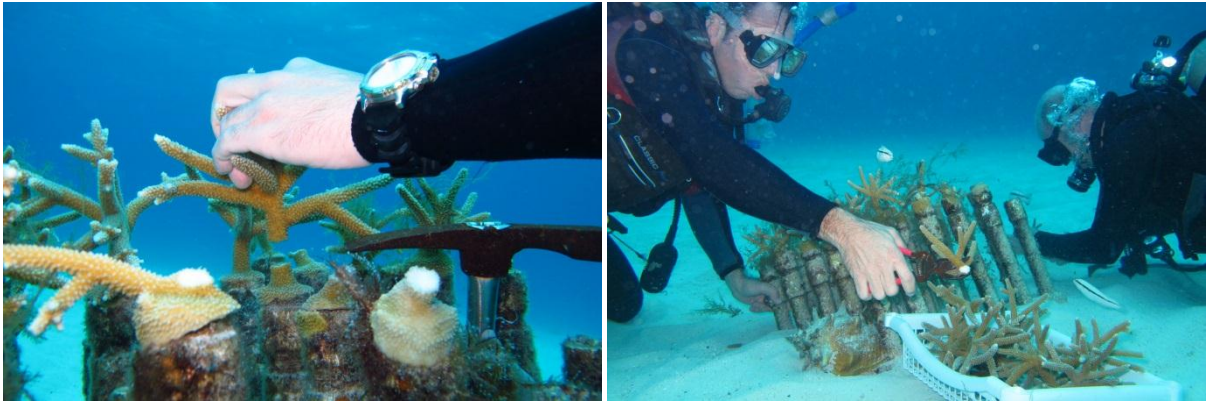


FIGURA 25. Colecta de fragmentos en los sistemas de cultivo marino (SCM) de Bajo Pepito para abastecer los sistemas de cultivo externos (SCE) que se instaló en el CRIP Puerto Morelos, INAPESCA.

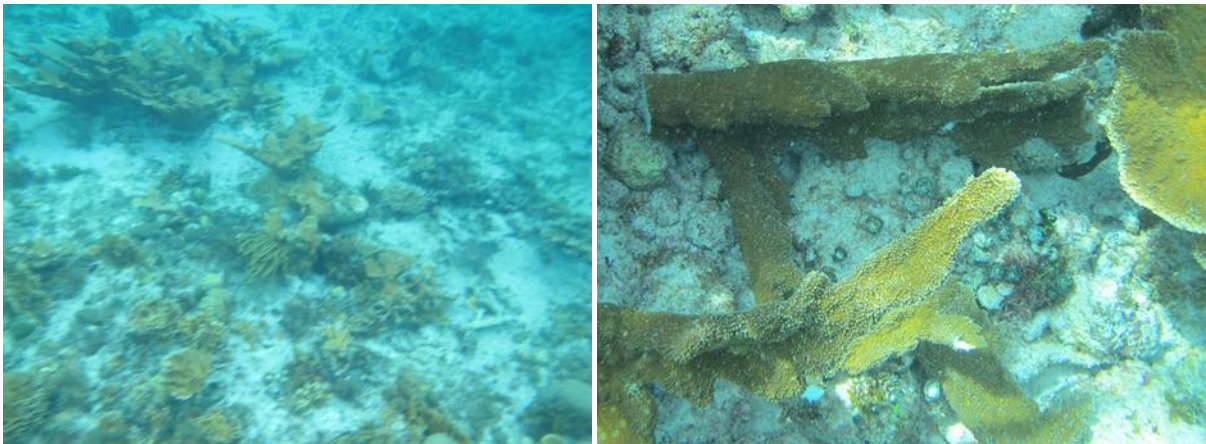


FIGURA 26. Colecta de fragmentos de oportunidad en el medio natural para abastecer los sistemas de cultivo externos (SCE) que se instaló en el CRIP Puerto Morelos, INAPESCA.



FIGURA 27. Colecta de material de tejido vivo creciendo sobre el cople de PVC para producir colonias por propagación clonal mediante el método de microfragmentación.

Las colonias colectadas fueron transportadas en hieleras a los sistemas de cultivo del INAPESCA en donde se mantuvieron en período de aclimatación para su posterior fragmentación (Figura 28).



FIGURA 28. Acondicionamiento de las colonias colectadas dentro de los SCE.

3.3.5. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero

Las actividades que se realizaron para la producción de colonias por propagación clonal fueron (Figuras 29 a 33):

- Elaboración de bases de cemento en conectores de PVC para fijar fragmentos de coral.
- Corte de fragmentos en tramos de aproximadamente 4 cm
- Pegado de los fragmentos en las bases de cemento en los conectores de PVC
- Etiquetado de las bases para identificación de cada fragmento.
- Mediciones de peso y longitud de los fragmentos producidos.
- Elaboración de base de datos para inventario de vivero



FIGURA 29. Corte con tijera y pegado de fragmentos.



FIGURA 30. Corte con sierra eléctrica de corte húmedo para producción de fragmentos



FIGURA 31. Etiquetado y producción de fragmentos.



FIGURA 32. Medición de altura y peso de los fragmentos.

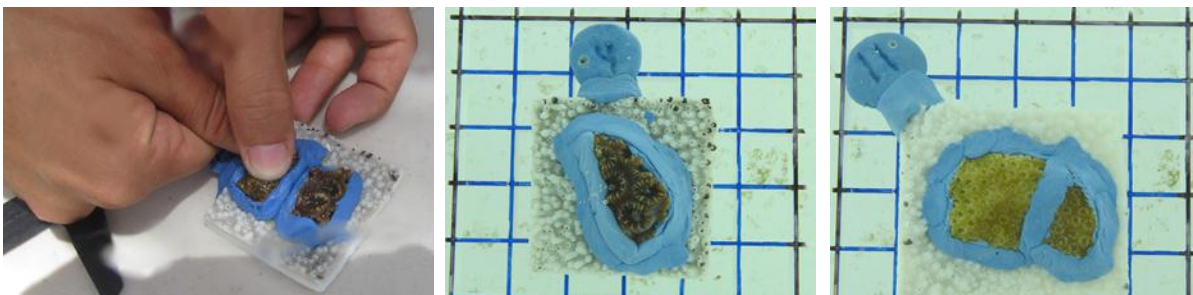


FIGURA 33. Producción de fragmentos para abastecimiento del SCE por el método de microfragmentación.

3.3.6. Exportación de fragmentos de coral

En esta etapa del proyecto se llevó a cabo la séptima transferencia de fragmentos de los sistemas de acuario al medio marino del lote de colonias que se produjeron en la etapa anterior.

El 30 de enero del 2016 se realizó el traslado de un total de 209 colonias (19 *Acropora palmata* y 190 *Acropora cervicornis*) que se mantenían en los Sistemas de Cultivo Externo (SCE) desde la etapa anterior hacia el vivero marino (SCM) (Figura 34).



FIGURA 34. Transporte de los fragmentos desde el SCE hacia el vivero marino (SCM) en Bajo Pepito.

3.3.7. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo (Acuario)

Se llevó a cabo un registro trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de los lotes de colonias producidas que se mantienen en los Sistemas de Cultivo Exteriores (SCE).

Para ellos se realizó una biometría, que consistió en medir el tamaño de las colonias y registrar su peso (Figura 35).



FIGURA 35. Registro para seguimiento de sobrevivencia y crecimiento en los SCE.

El monitoreo de los fragmentos que se produjeron por microfragmentación se realizó a través de la estimación de área mediante digitalización en SIG (Figura 36).

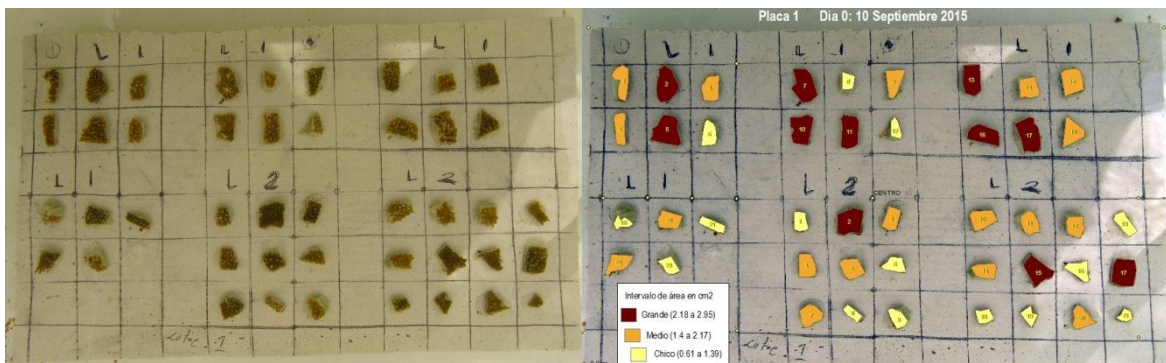


FIGURA 36. Registro fotográfico de los clones re-skinning *Acropora palmata* adheridos a placa graduada (izquierda) y clasificación por área mediante digitalización en SIG

3.4. Sistemas Marinos

3.4.1. Instalación de sistemas de cultivo en el mar con capacidad para 1200 fragmentos

En las 3 primeras etapas del proyecto se trabajó en la instalación de un sistema de cultivo marino (SCM), compuesto de 50 módulos de concreto. Cada módulo se construyó con una plancha de concreto para sostener tubos de PVC de 1.5" de diámetro y 20 cm de alto, con un conector hembra al final para recibir una colonia de coral fijada en un cople de PVC macho. Cada placa tiene capacidad para 20, 30 o 36 colonias, dependiendo del diseño para la especie que se mantendrá en cultivo (Figura 37).

Cabe mencionar que, en otra área de este mismo sitio, el Parque Marino tiene instaladas otras placas de cultivo para proyectos previamente ejecutados, con compromisos para el PACE-*Acropora palmata* que ejecuta la SEMARNAT.

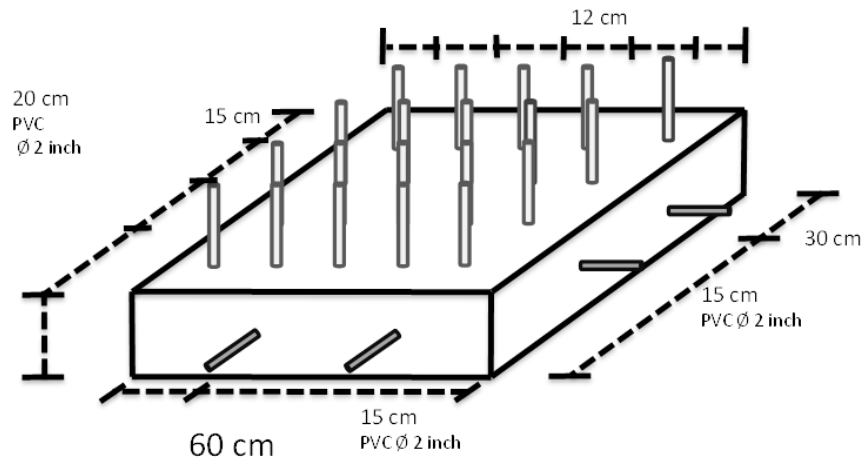


FIGURA 37. Diagrama de las planchas de concreto que se colocaron en el arrecife Bajo Pepito para instalar el sistema de cultivo marino (SCM) para corales.

3.4.2. Producción de nuevos fragmentos para abastecimiento del vivero

La producción de lotes de colonias para abastecer el vivero se llevó a cabo de manera semestral, a partir de la fragmentación de colonias para producir un mayor número de las mismas mediante el método de propagación clonal (Figura 38 a 41). Para ello se utilizaron tanto colonias del propio vivero como del medio natural.

Los procedimientos a seguir son:

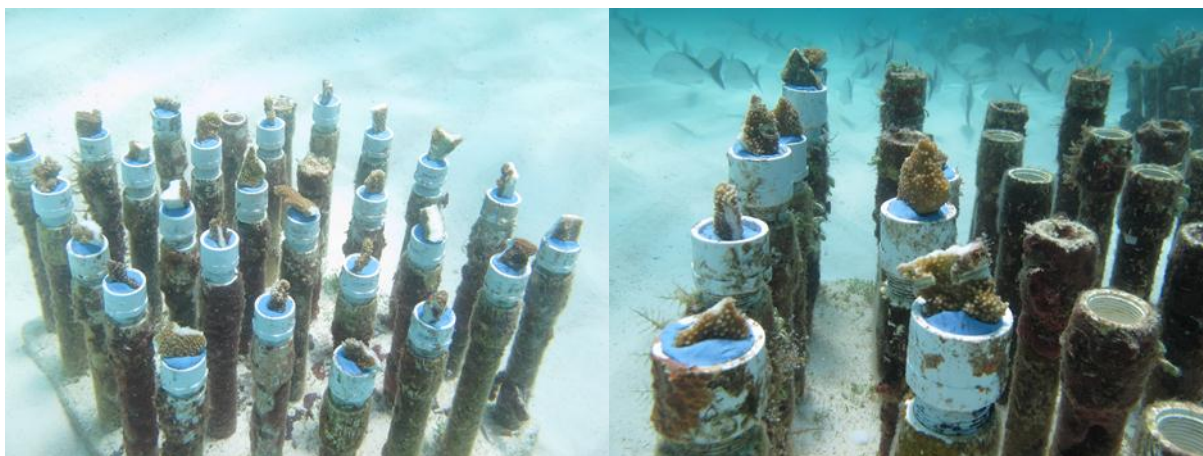
- Fragmentación de colonias
- Colocación del cementante
- Fijación de los fragmentos al conector de PVC
- Colocación de los conectores en las placas de concreto del vivero



FIGURA 38. Registro fotográfico del procedimiento de fragmentación y colocación de nuevas colonias de la especie *Acropora cervicornis* en el vivero de coral. Se seleccionan las colonias donadoras y se cortan algunas ramas (izq. arriba). Las ramas a su vez son cortadas en fragmentos más pequeños (der. arriba). Los fragmentos son colocados en los conectores con cemento de secado rápido (izq. Abajo). Los conectores con los fragmentos son colocados en las placas de concreto del vivero (der abajo).



FIGURA 39. Fragmentación para la producción de colonias por propagación clonal de la especie *Acropora palmata* en el vivero marino (SCM). Buzo realizando fragmentación con ayuda de cincel y mazo (izq.). Los fragmentos de coral se disponen en una canasta para su transporte (der.).



- **FIGURA 40.** Los fragmentos de coral *Acropora palmata* estabilizados en conectores de PVC empelando epóxico marino y dispuestos en las planchas de concreto del vivero marino Bajo Pepito (SCM).



FIGURA 41. Diferentes especies de coral producidos en el vivero de coral (SCM).

3.4.3. Exportación de fragmentos de coral de sistemas de cultivo en mar a sitios de restauración

Para los eventos de siembra de corales en los sitios de restauración fue necesario realizar eventos de exportación de fragmentos desde los sistemas de cultivo en el mar. Se emplearon canastas para coleccionar las colonias que se retiraban de las placas del vivero marino para luego subirlas a la embarcación, en donde fueron transportadas en hieleras tapadas, y luego llevadas al sitio de siembra, en donde se retiró el cople de PVC para su siembra (Figura 42).

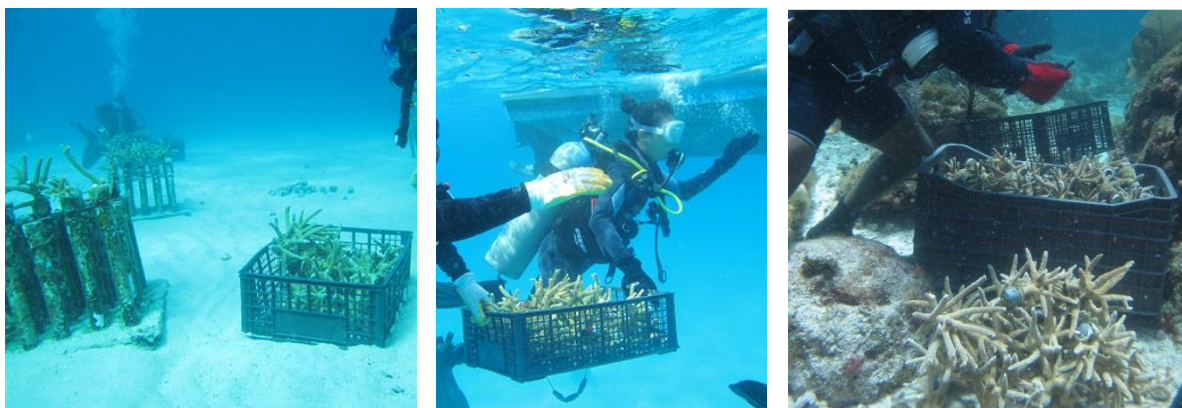


FIGURA 42. Traslado de colonias del SCM al sitio de restauración para realizar la siembra programada en la etapa. Recolección de colonias en el SCM-Bajo Pepito (izq), traslado en embarcación de las colonias (centro) y colonias en áreas de restauración para su siembra (der.).

3.4.4. Monitoreo trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo

Se llevaron a cabo 16 registros del monitoreo para evaluar la sobrevivencia y crecimiento de los corales en cultivo en el vivero del SCM (Figura 43).

Los datos que se tomaron para el registro fueron los siguientes:

- Especie de cada fragmento
- Identificación individual de cada fragmento (Número de placa y número de tubo)
- Sobrevivencia de los fragmentos por especie (vivo vs. Muerto)
- Condición del individuo (Sano vs. Daño)
- Tipo de daño (blanqueamiento/ enfermedad/ otro)
- Altura de cada fragmento en cm (muestra de 30%)



FIGURA 43. Monitoreo de los corales en cultivo en el módulo del Sistema de Cultivo Marino (SCM).

3.5. Sucesión

3.5.1. Monitoreo de los componentes estructuradores

3.5.1.1. Escala de 1m²

Utilizando las marcas permanentes, se colocó un cuadro de 1m² de nylon para delimitar el área de medición. Dentro del cuadro se contaron el número de erizos *Diadema antillarum* y se identificó el estadio de desarrollo que tenían (i.e. adultos o juveniles). Los juveniles de esta especie destacan por presentar un patrón anillado en las espinas.

3.5.1.2. Escala de 10 × 10 cm

Para los meses de diciembre de 2015 y abril de 2016, se seleccionaron aleatoriamente 20 cuadros en la zona de impacto y 20 en la zona de referencia. En la sección 1 de los cuadros de 1 m² se colocó un cuadro de PVC de 50 × 50 cm procurando una posición horizontal al sustrato (Figura 44).



FIGURA 44. Disposición de un cuadro de 50 × 50 cm sobre el sustrato del parche arrecifal Cuevones.

El cuadro está dividido en 25 unidades de 10 × 10 cm. De éstas, cinco unidades fueron seleccionadas de manera aleatoria. En cada unidad seleccionada, y con la ayuda de una gradilla graduada cada cm, se midió la cobertura (cm²) de los cinco grupos funcionales de algas; esto es, macroalgas carnosas (MAC), algas calcáreas ramificadas (CR), algas filamentosas (AF), algas costrosas coralinas (CC) y algas costrosas no coralinas (CnC). Cada centímetro fue asignado al grupo cuya cobertura abarcara más del 50% del mismo. Los organismos que se colectaron fueron aquellos que estuvieran establecidos sobre el sustrato de manera directa, i.e. no se midió la cobertura de los grupos establecidos sobre otros.

Los reclutas de coral fueron buscados en las 25 unidades de 10 × 10 cm de los 40 cuadros de cada una de las porciones del arrecife (i. e, impactada y no impactada) y cada uno fue identificado hasta el nivel de género. Sólo fue posible colectar datos en abril y octubre de 2015 y abril de 2016.

3.6. Reproducción sexual

3.6.1. Evento reproductivo para obtención de reclutas sexuales en laboratorio.

Los corales de desove masivo como los géneros *Acropora*, *Orbicella* (= *Montastraea*) y *Diploria* liberan sus gametos una o dos veces al año durante eventos de desove sincronizados (Harrison 2011); de manera histórica se ha observado que en el Caribe Mexicano estos eventos tienen lugar de 2 a 6 días después de la luna llena en los meses de julio y/o agosto para *Acropora palmata* (Figura 45), de 5 a 7 días después de la luna llena en los meses de agosto y/o septiembre, para *Orbicella* (= *Montastraea*) *faveolata* y para *Diploria labyrinthiformis* entre 10 a 13 noches después de la luna llena (Coral Spawning Research Blog 2012, Sitio web de Secore Foundation 2013; Banaszak observaciones personales).

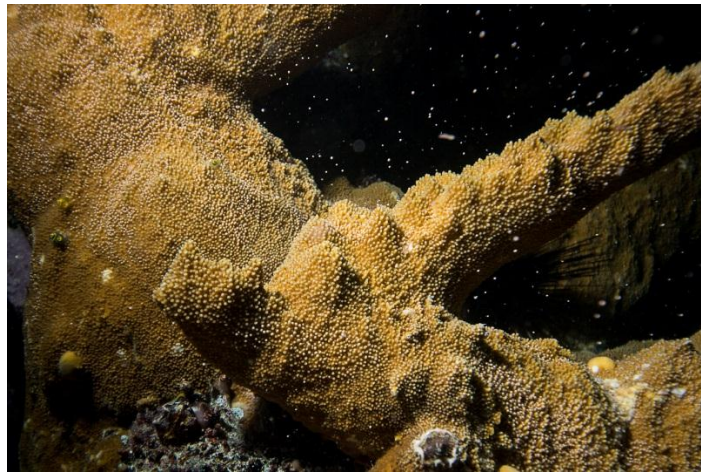


FIGURA 45. Desove *Acropora palmata*. Foto: Paul Selvaggio masivo de.

Con base en estas observaciones, se planearon un total de ochenta y nueve campañas con la finalidad de recolectar gametos de corales de desove masivo en un total de seis sitios. Los sitios fueron “El Bajito” en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, en donde se muestreó en dos sitios distintos; en la Unidad Arrecifal “Limonos” y dos sitios de muestreo en “La Bocana Chica y finalmente en Punta Venado.

En cada sitio de muestreo el plan de colecta de gametos fue el mismo y la logística se adecuó a las necesidades del grupo de trabajo y la especie de coral. Para *A. palmata* se realizaron dos inmersiones por noche, la primera antes del crepúsculo para colocar las redes de colecta de gametos y la segunda aproximadamente a las 21:00 para realizar la colecta de gametos. Se colocaron 10 redes (Figura 46) por especie en un rango de profundidad de 1 a 3 m. Para *O. faveolata* y *D. labyrinthiformis* se realizaron una inmersión por noche para colocar la red en un rango de profundidad de 3 a 7 m y continuar con la colecta de gametos. El tiempo promedio de observación por cada inmersión fue de 1.5 h.



FIGURA 46. Colocación de red de colecta sobre una colonia de *Acropora palmata* para la colecta de paquetes de gametos. Foto: Paul Selvaggio.

Los gametos colectados en botes de plástico se trasladaron a la embarcación, en donde se juntaron los contenidos en un recipiente plástico de 20 l y se mezclaron con agua de mar filtrada (1 μm) y esterilizada (lámpara de radiación Ultravioleta C). Los paquetes de huevos y esperma se separaron agitando el agua con delicadeza (Figura 47) y se mantuvieron en el contenedor por aproximadamente 2 h para permitir la fertilización. Los huevos fertilizados se trasladaron al laboratorio en donde se limpiaron para eliminar el exceso de esperma y los depredadores.



FIGURA 47. Asistencia para incrementar la probabilidad de fertilización. Foto: Paul Selvaggio.

Los huevos fertilizados se trasladaron a dispositivos de incubación, que contenían agua de mar filtrada y esterilizada con UV. Se realizaron cambios diarios de agua a todos los contenedores con la finalidad de eliminar la materia orgánica y el moco liberado, la temperatura se mantuvo estable a 28°C. Aproximadamente a los 4 días se retiraron los dispositivos de incubación y se colocaron los sustratos de asentamiento. Los sustratos de

asentamiento fueron elaborados en forma de tapones a base de arena y cemento blanco para *A. palmata* y placas de cerámica para *O. faveolata*, acondicionados biológicamente durante 2 meses en la laguna arrecifal de PNAPM (Figura 48). Para *D. labyrinthiformis* se colocaron placas y tapones.



FIGURA 48. Tapones acondicionados biológicamente en el mar durante 2 meses antes del asentamiento por larvas de coral. Foto: Sergio Guendulain García.

Se realizaron 2 cambios de sustratos de asentamiento por contenedor para obtener un menor número de larvas asentadas por sustrato para evitar la mortalidad dependiente de la densidad. Durante este periodo se hicieron cambios diarios de agua, y la superficie se limpió utilizando una película plástica autoadherible (Figura 49) tantas veces como fue necesario, para retirar los lípidos metabolizados por las larvas y prevenir la formación de una capa microbiana (Erwin y Szmant 2010).



FIGURA 49. Limpieza de la superficie del agua para retirar los lípidos metabolizados por larvas del coral. Foto: Sergio Guendulain García.

A los diez días se realizó la inoculación de simbios, para lo cual se colectaron fragmentos de diferentes colonias de *A. palmata*. Una vez en el laboratorio el tejido del coral se desprendió del esqueleto con agua de mar filtrada (AMF) a presión utilizando un Water-Pik. El extracto colectado (Figura 50) se centrifugó a 5000 rpm a 25°C durante 5 min. Se resuspendió el pelet resultante con un vórtex durante 3 segundos y se unificó el pelet con un homogenizador de tejidos de vidrio/vidrio. Posteriormente, se inocularon los reclutas disminuyendo el nivel de agua del contenedor para una mejor disposición de los simbios hacia los reclutas. Días después se confirmó la simbiosis distinguiendo una

pigmentación café de los simbioses dentro del recluta al ser observados bajo un estereoscopio y al percibir una fluorescencia roja de la clorofila del simbiote durante su exposición a la luz azul (Banaszak obs. pers.).



FIGURA 50. Extractos de simbioses de *Acropora palmata* listos para usar en la inoculación de reclutas sexuales recién asentados. Foto: Sergio Guendulain García.

Los sustratos con larvas asentadas se trasladaron a contenedores plásticos con agua de mar, en donde permanecieron por aproximadamente quince días. Durante este periodo se hicieron cambios de agua con ayuda de una manguera y un tamiz de 100 μm y se mantuvo la temperatura del agua a 28°C. Una vez finalizado este periodo los sustratos de asentamiento se trasladaron a los sistemas de cultivo.

Para realizar el experimento de inoculación con seis diferentes subclados de simbioses, se aislaron simbioses de 6 colonias de *Acropora palmata* genéticamente identificados en estudios anteriores para asegurar que los subclados fueran diferentes (Gómez-Campo y Banaszak, datos no publicados). Se recolectaron fragmentos de las seis colonias y se aislaron los simbioses como se detalla arriba. Las etiquetas de las colonias son 454, 456, 459, 460, 462 y 470. Se determinaron las concentraciones de las células para determinar el volumen de inoculación y asegurar que cada contenedor con reclutas asentadas contaba con el mismo número de simbioses al momento de la inoculación (5×10^7).

3.6.2. Sistemas de cultivo para reclutas: módulos UNAM, Xcaret e INAPESCA

El módulo en la UNAM consiste de cuatro acuarios con capacidad aproximada de 800 l cada una, en un sistema de flujo abierto. El agua proviene de la laguna arrecifal y es tratada con ozono. La temperatura del agua se mantiene entre 28°C y 31°C con ayuda de un termostato, un enfriador y un calentador. Los acuarios se encuentran techados con policarbonato transparente cubierto por malla sombra, la iluminación es natural y se regula con ayuda de malla sombra colocada sobre el sistema. Cada tanque cuenta con movimiento de agua constante generado por un dispositivo que simula las condiciones de la cresta arrecifal creando una turbulencia para los corales.

Las placas de asentamiento se colocaron sobre bases fabricadas con rejilux. De manera cotidiana se mide la temperatura y salinidad del agua del sistema y se realiza la limpieza tanto de los tanques, para eliminar sedimento acumulado, como de las placas de asentamiento para evitar el sobrecrecimiento por algas. A los reclutas no se les proporcionó ningún tipo de alimento, hasta dos meses después, ya que el 90% de los reclutas se encontró inoculado con simbiontes. Para esto se emplearon alimentos comerciales de la marca Kent Marine, tales como: Liquid reef, K rally-VM y Coral Amino. Todos se aplicaron en las proporciones recomendadas por el fabricante.

El módulo de Xcaret consiste de cuatro tinas con capacidad de 2,400 litros, en un sistema de flujo abierto. El agua proviene de la laguna arrecifal y no está filtrada ni esterilizada. El recambio de agua se hace al 100% cada 30 min y cada tanque cuenta con movimiento de agua constante generado por dos dispositivos que simulan las condiciones de la cresta arrecifal creando una fuerte turbulencia para los corales. La iluminación es natural y se regula por medio de policarbonato transparente cubierto por malla sombra. Los reclutas sexuales se alimentaron con suplementos de la marca Kent Marine y *Artemia*. Las tinas de cultivo, así como los tapones y bases de asentamiento, se limpiaron periódicamente para evitar el sobrecrecimiento por algas.

El módulo de INAPESCA consiste de 1 tina de 4 m de largo y 1 metro de ancho con capacidad de 4,000 litros en un sistema de flujo cerrado, con recambios parciales de agua y movimiento constante de agua por generación de ola en un extremo de la tina y turbinas laterales. El agua proviene de la laguna arrecifal y está filtrada y esterilizada. La luz es artificial con períodos de 6 horas, y la temperatura se regula en 28  C. Los reclutas son alimentados con suplementos de la marca Kent Marine y alimento vivo (rotíferos y *Artemia*). Se mantiene una rutina de limpieza para evitar sobrecrecimiento de algas.

3.6.3. MONITOREO de reclutas sexuales.

Los reclutas de *Acropora palmata* obtenidos de los eventos reproductivos fueron repartidos entre las instituciones: Xcaret, INAPESCA y UNAM y cultivados en los sistemas de acuarios de las instituciones respectivas.

A los reclutas que se produjeron en cada verano, se les dio mantenimiento de manera rutinaria. La limpieza de las placas o sustratos en donde estaban asentados se realizó semanalmente para evitar el sobrecrecimiento por algas y aumentar la probabilidad de su sobrevivencia. Además, se alimentaron diariamente con nauplios de *Artemia*, rotíferos y suplementos alimenticios de la marca Kent marine. Se dise n  un sistema de cultivo de rotíferos alimentados con microalgas para que posteriormente dichos rotíferos sirvieran como alimento vivo para los reclutas. Los acuarios se limpiaron cada tercer día retirando algas filamentosas que podrían ser perjudiciales para el desarrollo de los reclutas. Se monitoreó con sensores de temperatura, así como de la intensidad de la incidencia de luz de cada acuario. Se realizó un registro del número de reclutas asentados por placa y por tapón, elaborando una base de la información en una hoja de datos de Excel.

El seguimiento y registro de la sobrevivencia se realizó cada tres meses en los tres módulos: Xcaret, UNAM e INAPESCA. Adicionalmente, en cada registro se tomaron fotografías digitales. Todas las fotografías se tomaron con ayuda de un nivel de aceite asegurándose que tanto la cámara como las placas y tapones se encontraban en posición horizontal, también se anexó una escala de papel milimétrico en cada toma. Todas las fotografías se encuentran en formato digital y están organizadas electrónicamente en carpetas por módulo del vivero, a su vez cada módulo está organizado en subcarpetas

con las etiquetas del sustrato de asentamiento que corresponden. Cabe señalar que en la carpeta del módulo de Xcaret las fotografías están separadas por especie.

En abril 2014, se trasladaron las reclutas de los desoves de 2011, 2012 y 2013 del vivero terrestre en Xcaret a dos viveros marinos; uno en el PNAPM y el otro en el sitio “Las Ruinas” fuera de Xcaret. Se tenía programado este traslado desde octubre 2013, sin embargo, por el mal clima de septiembre 2013 a febrero 2014 y las constantes lluvias, los reclutas se mantuvieron en los viveros terrestres. Para este fin se construyeron 6 placas de concreto de 50cm x 50cm x 20cm. Durante el colado del cemento a cada placa se le colocaron 20 tubos de PVC de 35 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro. Por lo que el vivero cuenta con la capacidad para 120 reclutas. El registro de sobrevivencia y crecimiento se realizó directamente en los viveros marinos cuando las condiciones climatológicas lo permitían. Para los monitoreos de crecimiento se midieron las longitudes de los diámetros mayores y menores, alturas desde la base y número de ramificaciones o brazos de cada uno de los reclutas con un vernier y una escala, también se lleva un registro fotográfico, con la ayuda de un dispositivo que mantiene la misma distancia e inclinación cada fotografía para cada una de las placas y así poder determinar el crecimiento en el área por medio de software digitales. El mantenimiento general de los viveros consistió en la limpieza quincenal de las plataformas, la elaboración y colocación de nuevas etiquetas, debido al deterioro de las anteriores.

El día 4 de febrero del 2015, se transportaron los reclutas sexuales desde el vivero de Xcaret en “Punta Venado”, hacia el vivero de corales de la UNAM en Puerto Morelos, durante la introducción de los organismos al nuevo sitio se aclimataron a la temperatura, haciendo recambios graduales de agua. El día 6 de febrero del 2015 se registraron las tallas de todos los reclutas del vivero de la UNAM, incluyendo los de Xcaret, previo a la colocación de reclutas en el arrecife de Cuevones.

El día 11 de febrero se traspasaron 20 reclutas sexuales (10 provenientes del vivero de Xcaret y 10 del vivero de la UNAM, incluyendo reclutas del desove del 2011 y 2012) desde el vivero de corales de la UNAM en Puerto Morelos, hacia el arrecife “Cuevones” en Cancún, con fines de restauración. Se colocaron dentro del arrecife, utilizando una mezcla de cemento y arena de mar, para fijarlos al fondo arrecifal, identificados con su etiqueta correspondiente. Durante el cambio de sitio, los organismos se aclimataron a la temperatura del agua del nuevo sitio y fueron transportados con una malla-sombra para evitar un estrés lumínico.

Se dio mantenimiento a los viveros y a los corales obtenidos de los desoves de 2011, 2012 y 2013 ubicados en el vivero marino de la UNAM en el PNAPM, realizando limpieza general del vivero, cambio de trampas de sedimento, sensores de temperatura y observación de las colonias. Para este fin se realizaron salidas de campo, en las cuales se limpió el vivero retirando las algas filamentosas, carnosas y el exceso de sedimento. Además, se realizó el monitoreo de los corales ubicados en el vivero marino de la UNAM, para el cual se tomaron medidas del tamaño de cada colonia, el número de ramas y se continuó con el registro fotográfico. En los acuarios de la UNAM se realizaba el monitoreo correspondiente, registrando la supervivencia de los reclutas de coral obtenidos en los desoves.

Se analizó la supervivencia de los reclutas cultivados en acuarios, en el vivero marino y en el arrecife donde algunos reclutas sexuales fueron sembrados finalmente.

4. RESULTADOS

4.1. Marcaje

Esta actividad se concluyó durante la primera etapa del proyecto, con lo que se cumplió con el **100%** de avance.

4.1.1. Marcaje permanente de áreas para restauración activa

El marcaje permanente de las áreas que se trabajaron para restauración activa durante este proyecto se concluyó satisfactoriamente al 100%. El área delimitada con el marcaje permanente ocupó un total de 707 m²; siendo 357 m² para Arrecife Cuevones y 350m² para Arrecife Manchones, siendo superior a lo comprometido en el proyecto. Se entrega una base de datos con los datos del sitio de estudio para ambos arrecifes (ANEXO 7.1.1. Sitios de estudio)

En ambos arrecifes se delimitó el área en la que se llevaron a cabo las actividades de restauración, y se estableció el marcaje permanente que sirvió de referencia para el levantamiento de los fotocuadrantes. La instalación de las marcas permanentes permitió la colocación de cuerdas que sirven de guía para la ubicación de los fotocuadrantes (Figura 51).



FIGURA 51. Marcaje permanente para la toma de fotocuadrantes. Marca permanente en el vértice (izq.) y tendido de cuerdas sobre el marcaje permanente como referencia para fotocuadrantes (der.).

En Arrecife Cuevones se delimitó un área de 357 m² para llevar a cabo las actividades de restauración activa, siendo una franja de 51 metros de largo x 7 metros de ancho; esta área se dividió en 5 cuadrantes, cada uno de 70 m², a excepción del cuadrante B que tiene 77 m². En el caso de Arrecife Manchones el área a restaurar es de 350 m², distribuidos en una franja de 50 metros de largo x 7 m de ancho, dividido en 5 cuadrantes de 70 m cada uno (Figura 52).

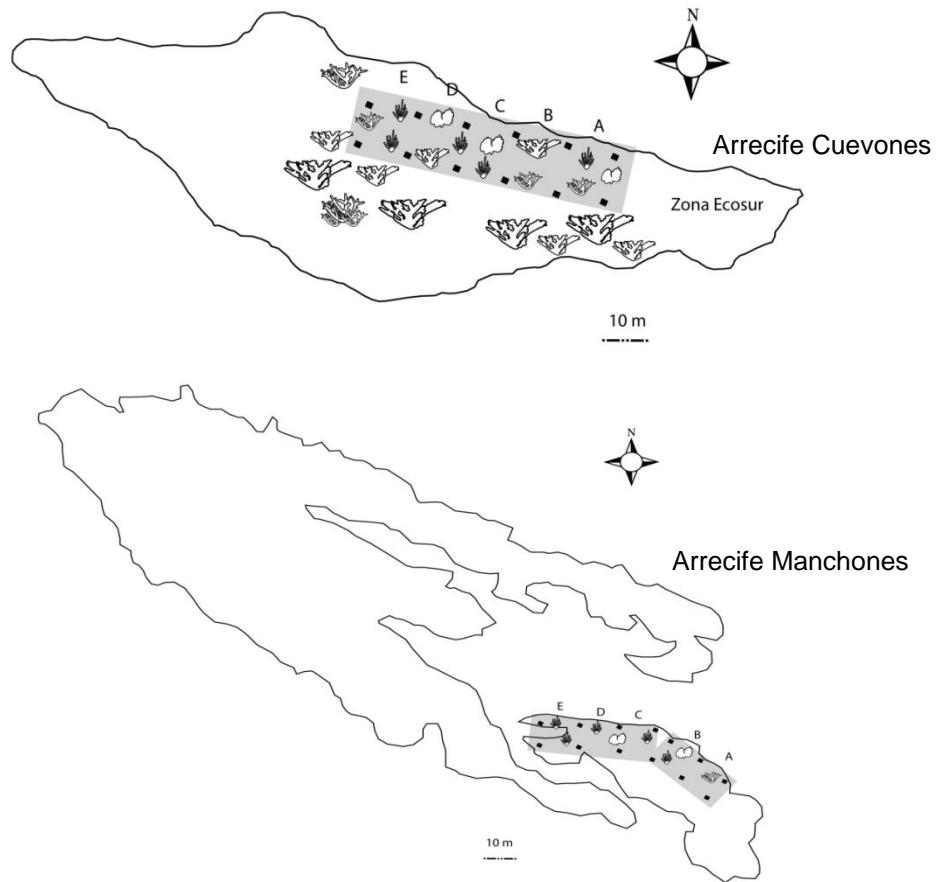


FIGURA 52. Esquemas de los 2 arrecifes que se eligieron como sitios de muestreo, indicando en cada uno el área que se destinará para restauración (área gris, señalando con puntos la ubicación de las marcas permanentes que se colocaron)

En la tercera etapa del proyecto se procedió a colocar nuevos tubos de mayor diámetro y altura, fijos al sustrato con una varilla clavada al sustrato y con una base de cemento que penetró en la parte interior del tubo. De esta manera el marcaje resultó ser más eficiente (Figura 53).

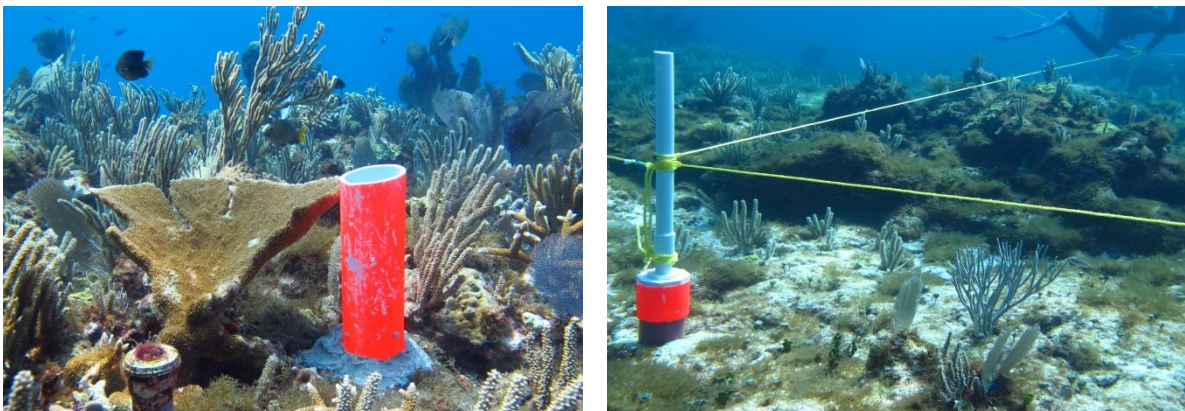


FIGURA 53. Marcaje permanente en las áreas de restauración en Arrecife Cuevones y en Arrecife Manchones.

4.1.2. Marcaje permanente de área para evaluación sucesional

Dentro de los 80 cuadros se evaluó la estructura de la comunidad de corales adultos y la densidad de *D. Antillarum*. La comunidad de corales adultos fue evaluada en cinco ocasiones: febrero de 2013, agosto de 2013, febrero de 2014, septiembre de 2014 y octubre de 2015. Para la obtención de los datos de las colonias se usó un cuadro de 1m² de nylon para delimitar el área de medición. Las mediciones de las colonias que se obtuvieron fueron las mismas que se hicieron a la escala de parche. El área de las colonias de corales pétreos y los grupos epibiontes se calculó como una elipse usando el diámetro máximo y el diámetro perpendicular. Usando estas coberturas, se estimó el área de tejido vivo restando el área de los grupos epibiontes y mortalidad reciente al área total de la colonia. La densidad de erizos de *D. antillarum* se registró de manera bimestral desde febrero de 2013 hasta diciembre de 2014, en abril y octubre de 2015; también se identificó el estadio de desarrollo que tenían (i.e. adultos o juveniles). Los juveniles de esta especie destacan por presentar un patrón anillado en las espinas (Hendler *et al.* 1995).

4.1.3. Caracterización de áreas a restaurar

La caracterización inicial de las áreas a restaurar en los 2 arrecifes se concluyó satisfactoriamente al 100%. Adicionalmente se presenta una comparación de la caracterización final de las áreas de restauración al término del proyecto.

a) Arrecife Cuevones

El sitio en donde se llevaron a cabo las acciones de restauración activa en el Arrecife Cuevones se delimitó por un área de 51 metros de largo por 7 metros de ancho, seccionada en 5 cuadrantes de 10 x 7 m cada uno; a excepción del cuadro B que tiene 11 x 7 m, formando una franja orientada aproximadamente del Este al Oeste. El sitio se encuentra entre 5 y 10 metros de profundidad en promedio, con un sustrato heterogéneo y rugoso, formado por la matriz calcárea del arrecife, con algunas áreas poco compactadas.

Dentro del área de estudio se pueden reconocer 3 regiones longitudinales. La parte Sur o barlovento corresponde al límite con el arrecife no impactado por el encallamiento, y forma una franja en donde la estructura tiene un mayor relieve y es más somera, siendo también la zona de mayor corriente. Contiguo a esta zona se encuentran algunas colonias de *Acropora palmata* de tamaño mediano en la parte más elevada de la estructura, y posteriormente se forma un escalón abrupto que forma la parte de Barlovento del arrecife.

En la parte central se forma una planicie extensa, de unos 5 metros de ancho aproximadamente, en la cual existe una alta densidad de gorgonáceos, con una alta dominancia de la especie *Eunicea mammosa*. Esta especie forma colonias arborescentes en forma de candelabro que actualmente tienen de 10 a 20 cm de altura, por lo que parece ser la población más abundante que se logró establecer posterior al impacto. También se encuentran ejemplares de otras especies de gorgonáceos en menor abundancia como son *Plexaura flexuosa*, *Plexaura homomalla*, y *Pseudoplexaura* sp; así como colonias en forma de abanico del género *Gorgonia*, y gorgonáceos incrustantes de la especie *Erythropodium caribaeorum*. La presencia de corales en este sitio es baja, siendo principalmente colonias pequeñas de la especie *Porites astreoides*, y algunas de la especie *Acropora cervicornis*

La franja Norte del área corresponde al borde sotavento de la estructura coralina, marcando el límite del arrecife con el arenal, en donde se forma un desnivel de 1 a 2 metros de altura, en donde se encuentran algunas colonias del coral *Orbicella annularis*.

- Biota sésil:

a) Al inicio del proyecto

En cuanto al análisis de abundancia de organismos sésiles, al inicio del proyecto se observa que el sustrato está dominado por macroalgas, estimando un 55.6% de cobertura algal, encontrando como especies dominantes *Dictyota* sp., *Halimeda* sp., algas rodofitas y cianofitas, formando tapetes sobre el sustrato calcáreo. La cobertura coralina se estimó en un 10% del sustrato (incluyendo 1% de cobertura de coral de fuego del género *Millepora*), y el resto del área (34.4%) estaba ocupada por sustrato, ya sea rocoso o arenoso, y otros elementos bióticos sésiles como gorgonáceos y esponjas. En el caso de los corales existía una dominancia marcada de las especies *Porites astreoides* y *Porites porites*, las cuales representan el 70% de este grupo taxonómico. El hidrocoral del género *Millepora* ocupa otro 10%, y únicamente el 20% de esta cobertura coralina corresponde a especies de coral que son consideradas los principales constructores arrecifales, incluyendo las especies *Acropora cervicornis*, *Acropora palmata* y *Orbicella annularis*; lo cual representa tan solo el 2% de cobertura total del área de estudio, junto con otras especies de baja presencia. En cuanto a la distribución de las especies de coral en el área de estudio tenemos que *Porites astreoides* y *Porites porites* se distribuyen a lo largo del área de estudio de manera homogénea; en cambio, *Acropora palmata* se concentra casi exclusivamente en la franja de Barlovento, y *Acropora cervicornis* abarca una zona más amplia incluyendo buena parte de la planicie central; mientras que *Orbicella annularis* suele encontrarse en la franja del Sotavento (Figura 54).

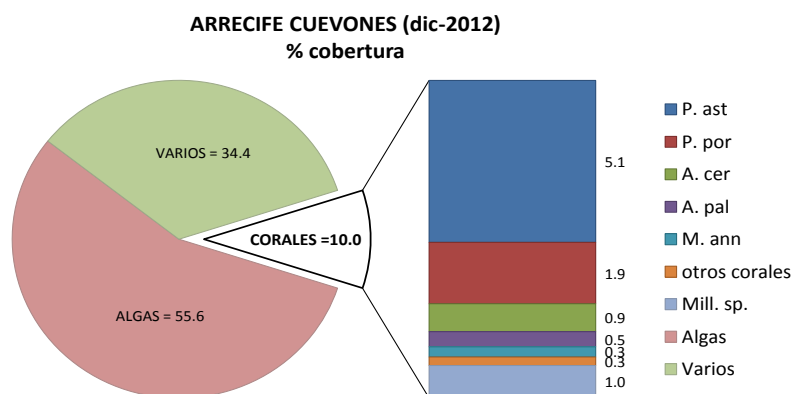


FIGURA 54. Porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en el área de estudio destinada a la restauración activa para el Arrecife Cuevones al inicio del proyecto.

La proporción de porcentajes de cobertura de los distintos elementos es similar a lo largo del área de estudio, mostrando pocas variaciones entre los 5 cuadrantes en que se dividió el área (Figura 55 y Tabla 6).

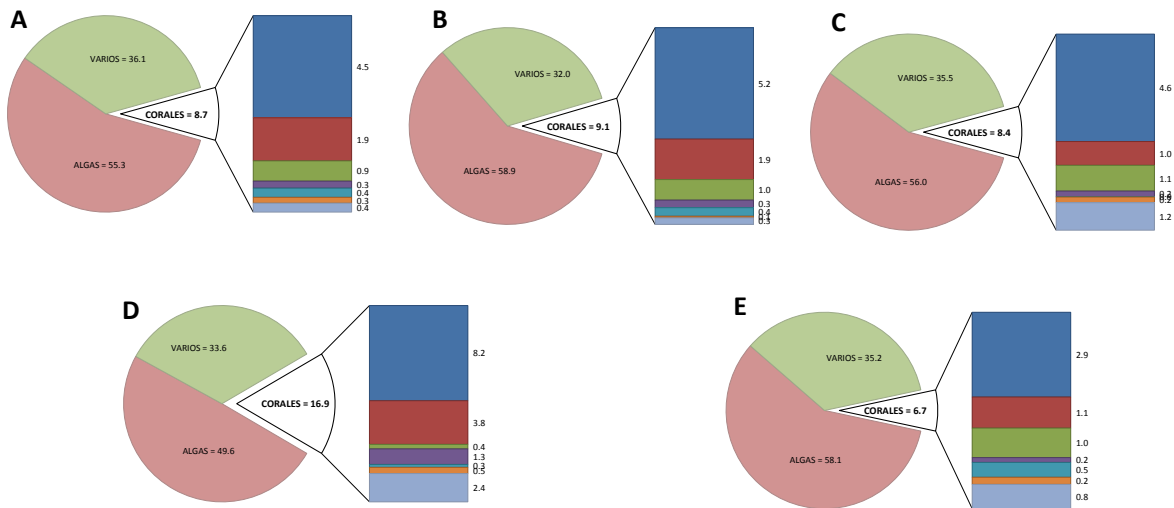


FIGURA 55. Representación gráfica del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Cuevones al inicio del estudio.

TABLA 6. Valores del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Cuevones al inicio del estudio.

Cuadrante	Corales							Algas	Varios
	<i>P. ast</i>	<i>P. por</i>	<i>A. cer</i>	<i>A. pal</i>	<i>M. ann</i>	otros corales	<i>Mill. sp.</i>		
A	4.51	1.90	0.89	0.31	0.41	0.26	0.39	55.28	36.05
B	5.16	1.87	0.95	0.35	0.40	0.07	0.30	58.94	31.95
C	4.62	1.03	1.11	0.24	0.01	0.24	1.18	56.03	35.53
D	8.19	3.76	0.39	1.34	0.26	0.53	2.44	49.56	33.55
E	2.90	1.06	1.01	0.16	0.51	0.25	0.83	58.07	35.21
TOTAL	5.08	1.92	0.87	0.48	0.32	0.27	1.02	55.62	34.42

b) Al término del proyecto

Al término del programa se observa que el sustrato aún se encuentra dominado por macroalgas, estimando un 55.83% de la cobertura relativa, encontrando especies dominantes como *Dyctiota sp.*, *Halimeda sp.* y rodofitas (algas costrosas calcáreas) que forman tapetes sobre el sustrato calcáreo y ayudando a consolidar el sustrato debido a que depositan carbonato de calcio, en menor medida encontramos a *Caulerpa sp.*, algas filamentosas y cianofitas. La cobertura coralina se estimó en un 13.87% del sustrato (incluyendo 1.27% de cobertura de coral de fuego del género *Millepora*), otros organismos bentónicos como corales blandos, esponjas, caracoles, etc., representaron el 22.47% de la cobertura y con respecto al sustrato desnudo (roca ó arena) ocupó un 7.77%. Con respecto a los corales duros, el género *Porites* (*Porites astreoides* y *Porites porites*) que representó el 46% de la cobertura relativa, el género *Acropora* (*Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*) considerados el principal formador de la barrera arrecifal en el Caribe fue el segundo más representativo con un 42% de cobertura relativa, el género *Millepora* obtuvo un 9% con respecto a los demás corales duros, cabe mencionar que aunque dicho género no se encuentra taxonómicamente dentro del orden de corales escleractineos tiene funciones y estructura similar por lo que se consideran corales duros. En menor

medida y representando un 1% están los corales duros de otras especies que se consideran aportan menor acreción al arrecife, las especies pertenecientes a los géneros *Montastrea* y *Orbicella* ocuparon apenas el 1% de la cobertura relativa (Figura 56).

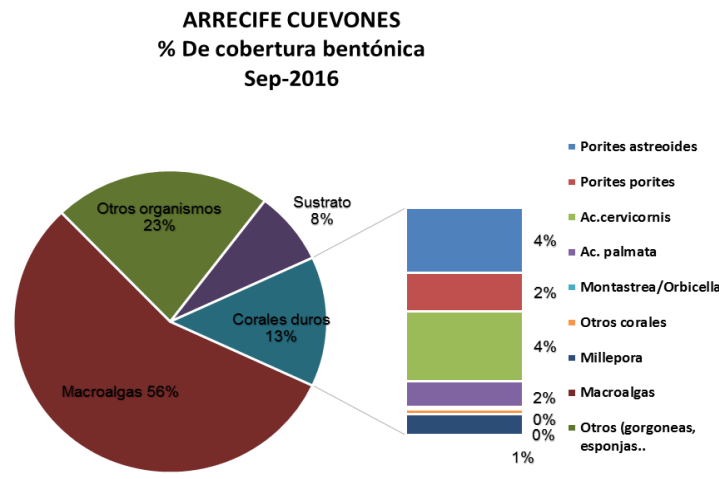


FIGURA 56. Porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en el área de estudio destinada a la restauración activa para el Arrecife Cuevones al final del proyecto.

Con respecto a la distribución espacial de las especies en el área de estudio podemos recalcar que *Porites astreoides* y *Porites porites* se distribuyen a lo largo del área de estudio de casi homogénea aunque muestra una ligera agregación hacia la planicie central del parche arrecifal, en cambio, la colonias de mayor cobertura *Acropora palmata* se concentra entre los cuadrantes C y D, y *Acropora cervicornis* abarca una zona más amplia incluyendo buena parte de la planicie central donde se concentra principalmente en los cuadrantes (B, C y D)

En cuanto a la proporción de porcentajes de cobertura de los distintos elementos de la biota sésil en el área de restauración se observa que hay diferencias entre los 5 cuadrantes (Figura 57 y Tabla 7).

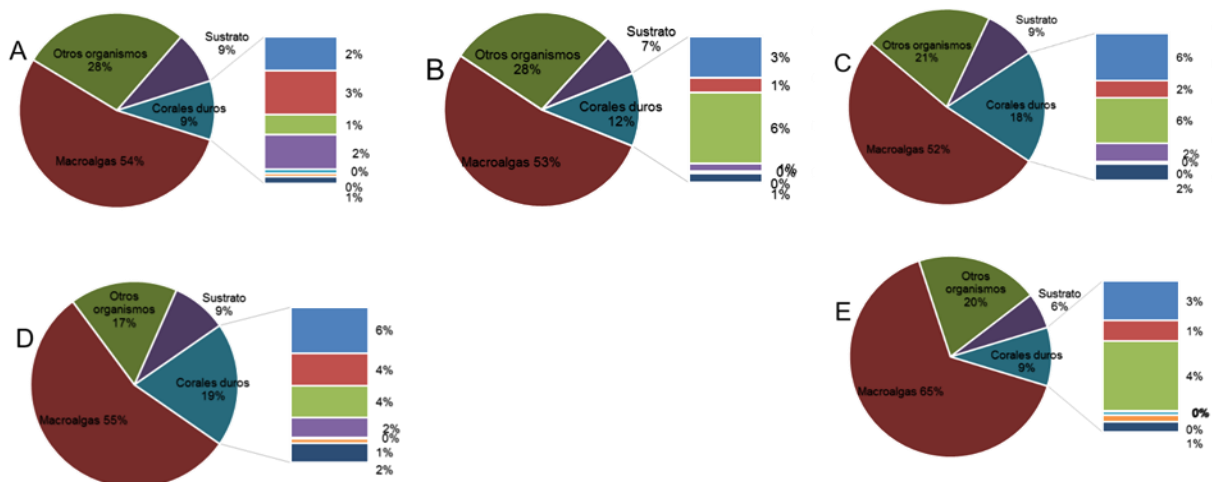


FIGURA 57. Representación gráfica del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Cuevones al final del estudio.

TABLA 7. Valores del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Cuevones al final del estudio.

Cuadrante	Corales							Algas	Varios	Sustrato
	<i>P. ast</i>	<i>P. por</i>	<i>A. cer</i>	<i>A. pal</i>	<i>M. ann</i>	otros corales	<i>Mill. sp.</i>			
A	2.24	2.94	1.37	2.30	0.30	0.20	0.45	53.77	27.72	8.72
B	3.44	1.24	5.91	0.66	0.09	0.08	0.76	53.26	27.47	7.10
C	6.00	2.18	5.72	2.37	0.08	0.19	2.10	51.87	20.87	8.62
D	5.76	4.01	3.94	2.50	0.16	0.58	2.36	55.00	16.72	8.63
E	2.46	1.25	4.34	0.05	0.23	0.40	0.67	65.25	19.58	5.77
TOTAL	3.98	2.33	4.25	1.57	0.17	0.29	1.27	55.83	22.47	7.77

Con respecto al 10 % de cobertura coralina que se estimó como valor inicial para el área de restauración en Arrecife Cuevones es importante comentar que fue un resultado inesperado, toda vez que el último valor registrado de cobertura coralina para esta zona fue de un 4.5% para el mes de enero del 2011 cuando se elaboró el proyecto. Esta diferencia se puede deber a varios factores, principalmente por diferencias en el tipo de muestreo, ya que en el año 2011 se hizo un levantamiento de fotocuadrantes sobre un transecto de 20 m², mientras que en este estudio se revisaron los fotocuadrantes de 357 m². Por otro lado, los métodos empleados para estimar la cobertura coralina fueron distintos; ya que en 2011 se utilizó un programa para digitalizar el área de cada colonia, mientras que para este estudio se utilizó el conteo de cuadros equivalentes a 10 cm² sobre la imagen proyectada. En complemento al punto anterior, se presenta una comparación de las estimaciones obtenidas del porcentaje de cobertura coralina por especie en el Arrecife Cuevones, en 4 diferentes épocas: 1998 (poco tiempo después del encallamiento), el año 2011 (cuando se escribió este proyecto), en 2013 (cuando se realizó la caracterización de los sitios para iniciar las actividades de restauración, y en 2016 (cuando se terminó el proyecto) (Figura 58 y Tabla 8).

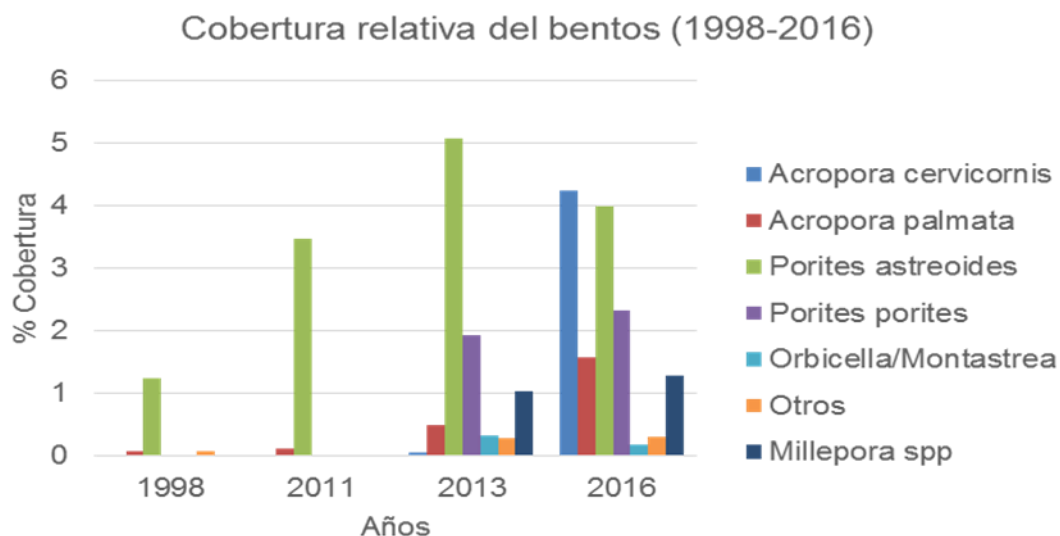


FIGURA 58. Gráfica del porcentaje de cobertura coralina por especie en Arrecife Cuevones justo después del encallamiento (1998), 13 años después (2011), 15 años después cuando se inicia el proyecto de restauración activa (2013) y 18 años después cuando se termina el proyecto (2016).

TABLA 8. Valores del porcentaje de cobertura coralina por especie en Arrecife Cuevones justo después del encallamiento (1998), 13 años después (2011), 15 años después cuando se inicia el proyecto de restauración activa (2013) y 18 años después cuando se termina el proyecto (2016).

Especie		1998	2011	2013	2016
Acropora	<i>cervicornis</i>			0.05	4.25
	<i>palmata</i>	0.06	0.11	0.48	1.57
Porites	<i>astreoides</i>	1.23	3.46	5.08	3.98
	<i>porites</i>			1.92	2.33
<i>Orbicella/Montastraea</i>				0.32	0.17
Otros		0.06		0.27	0.29
Millepora	spp			1.02	1.27
% Cobertura coralina		1.35	4.52	9.96	13.87

En este análisis se observa que, previo a la intervención de una restauración activa, la especie *Porites astreoides* es la que ha tenido una mayor presencia en el sitio, y que ha incrementado considerablemente su cobertura en el área a lo largo del tiempo, mientras que las especies con mayor importancia como constructores arrecifales como son *Acropora palmata*, *A. cervicornis* y *Montastraea annularis* se encuentran poco representadas. Después de concluir los trabajos de la restauración activa se logró incrementar la cobertura de estas especies para promover el restablecimiento de la composición original; siendo la más exitosa *Acropora cervicornis* que aumentó su cobertura hasta un 4.25%, lo que representa un aumento sumamente considerable con respecto a su cobertura inicial, *Acropora palmata* aumento su cobertura en más de 1% denota una recuperación menor a su homóloga del género, la recuperación en cobertura de éstas especies formadoras de arrecife, ha denotado un aumento en la complejidad estructural del sitio. Con respecto al género *Porites* considerado un colonizador y compactador de sustrato, podemos mencionar que su cobertura disminuyó para *Porites astreoides* *Porites astreoides* y aumentó para *Porites porites* esto debido a que las especies colonizadoras tienden a fluctuar su cobertura, hasta una normalización a través del tiempo.

-Comunidad de peces:

Se presenta un análisis de los cambios registrados en la comunidad de peces en Arrecife Cuevones. Se observa un incremento en la riqueza específica, con un registro de 19 especies al inicio de la restauración, incrementando a 31 y 36 especies a los 2 años de haber iniciado la siembra de corales, y 32 especies al terminar el proyecto de restauración. Se observó un aumento en las especies 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 en el año 2015 con una baja abundancia, y en el año 2016 se registraron 6 especies de estos géneros pero con un incremento en el rango de su abundancia (Tabla 9).

TABLA 9. Abundancia relativa de las especies de peces al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016), en Arrecife Cuevones. R=Raro < 1 individuo, E=Escaso=1-5 ind, C=Común=5-10 ind, A=Abundante=10-20 ind. y D=Dominante >20 ind. Las especies de importancia comercial y ecológica en la región se resaltan en azul.

Familia	Género	Especie	Nombre común	2013	2015-mar	2015-jul	2016-ago	
Acanthuridae	<i>Acanthurus</i>	<i>bahianus</i>	cirujanos	E	E		E	
		<i>chirurgus</i>			E	E	E	
		<i>coeruleus</i>		C	A	R	E	
Carangidae	<i>Caranx</i>	<i>ruber</i>			E			
Chaetodontidae	<i>Chaetodon</i>	<i>capistratus</i>				R	R	
		<i>striatus</i>					R	
Diodontidae	<i>Diodon</i>	<i>hystrix</i>					R	
Haemulidae	<i>Anisotremus</i>	<i>virginicus</i>	Roncos			R	R	
	<i>Haemulon</i>	<i>carbonarium</i>				E	E	
		<i>chrysargyreum</i>			D	E		
		<i>flavolineatum</i>		D	D	D	D	
		<i>melanurum</i>			D	E		
		<i>plumieri</i>		R			R	
		<i>sciurus</i>		R	A	C	E	
Holocentridae	<i>Holocentrus</i>	<i>coruscus</i>		E	R			
Labridae	<i>Bodianus</i>	<i>rufus</i>	Boquinete		E	R	R	
	<i>Clepticus</i>	<i>parrae</i>					R	
	<i>Halichoeres</i>	<i>bivitattus</i>				E	R	
		<i>garnoti</i>	E	A	E			
		<i>radiatus</i>			E	R		
	<i>Thalassoma</i>	<i>bifasciatum</i>		C	C	E	E	
Lutjanidae	<i>Lutjanus</i>	<i>apodus</i>	Pargos	E	D	C	E	
		<i>chrysurus</i>		E	E	R	R	
		<i>jocu</i>			E	R		
	<i>Ocyurus</i>	<i>chrysurus</i>				E		
Ostraciidae	<i>Lactophrys</i>	<i>poligonia</i>				R		
		<i>triqueter</i>	R					
Pomacanthidae	<i>Holacanthus</i>	<i>ciliaris</i>	Ángeles y Damiselas				R	
		<i>tricolor</i>		R	E	R	E	
	<i>Pomacanthus</i>	<i>arcuatus</i>			E			
<i>paru</i>				E	R	E		
Pomacentridae	<i>Abudefduf</i>	<i>saxatilis</i>				D	E	D
	<i>Chromis</i>	<i>cyanea</i>		D	D	C	C	
	<i>Microspathodon</i>	<i>chrysurus</i>		C	A	E	E	
		<i>diencaeus</i>						E
	<i>Stegastes</i>	<i>partitus</i>		C	C			
		<i>fuscus</i>	E					
		<i>planifrons</i>	E	E	E	E		
		<i>variabilis</i>						
Scaridae	<i>Scarus</i>	<i>croicensis</i>	Loros		E	R	E	
		<i>guacamaia</i>				R		
		<i>taeniopterus</i>			E	R	R	
		<i>vetula</i>					E	
	<i>Sparisoma</i>	<i>aurofrenatum</i>		C	C	R	E	
		<i>chrysopterus</i>		R	E	R		
		<i>rubripinne</i>			E	R	E	
		<i>viride</i>		A	R	E		
Serranidae	<i>Epinephelus</i>	<i>cruentatus</i>	Mero	R	E	R		
Sphyraenidae	<i>Sphyraena</i>	<i>barracuda</i>	Barracuda		A	E	E	
Número de especies				19	31	36	32	

La densidad de peces en este arrecife se estimó en 0.68 ind/m² en promedio al inicio de la restauración, mostrando un incremento significativo durante el año 2015 (4.21 ind/m² en marzo y 7.55 ind/m² en julio). Sin embargo, en el muestreo que se realizó en agosto del 2016 se observó una densidad promedio de 1.91 ind/m² (Figura 59)

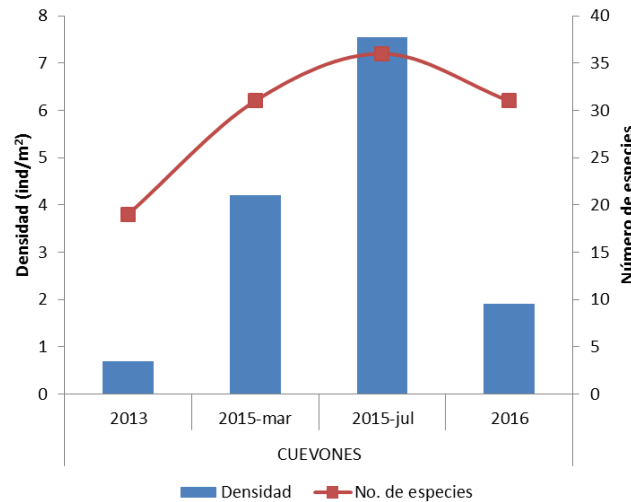


FIGURA 59. Cambios en la densidad y riqueza específica de peces en Arrecife Cuevones, al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016).

La estructura de tallas a lo largo del tiempo en Arrecife Cuevones muestra un incremento de organismos de la clase II durante el año 2015, posiblemente asociado con cardúmenes de peces que incrementaron el valor de densidad en esos muestreos. Finalmente, en el año 2016, al final de la restauración se observa un incremento en la proporción de organismos de tallas mayores, teniendo incluso presencia de ejemplares de la talla más grande (VI), siendo especies de niveles tróficos superiores (Figura 60).

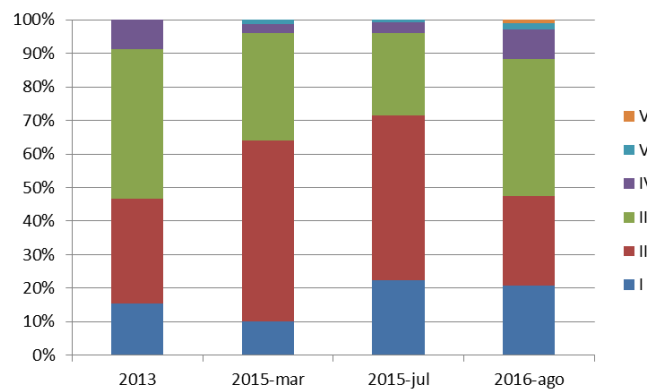


FIGURA 60. Estructura de tallas para la comunidad de peces en Arrecife Cuevones, al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016).
I=<5 cm, II=5-10cm, III=10-20cm, IV=20-30cm; V=30-40cm; VI=>40cm.

b) Arrecife Manchones

El sitio en donde se llevarán a cabo las acciones de restauración activa en el Arrecife Manchones está delimitada por un área de 50 metros de largo por 7 metros de ancho, seccionada en 5 cuadrantes de 10 x 7 metros cada uno, formando una franja con un ligero ángulo del E-SE al Oeste. El sitio se encuentra a unos 6 metros de profundidad en promedio, siendo más somero en el cuadro A, en donde la estructura es más heterogénea y rugosa; mientras que va ganando profundidad hacia el resto de los cuadros, teniendo un sustrato más plano y uniforme. El área en general tiene un sustrato poco compactado o cementado, pudiendo observar los fragmentos de material calcáreo en proceso de consolidación.

- Biota sésil:

a) Al inicio del proyecto

En este sitio la biota sésil es escasa, encontrando grandes áreas de laja o roca desnuda y suelta. Se estimó un 22.3 % de cobertura de algas, siendo dominantes las especies de los géneros *Dictyota sp.*, *Halimeda sp.*, así como algas rodófitas y cianófitas que forman una delgada capa sobre el sustrato, y solamente un 2.8 % de cobertura coralina. El resto del área es generalmente sustrato rocoso, encontrando de manera común colonias de gorgonáceos de las especies *Plexaura homomalla*, *Pseudoplexaura sp.*, y *Erythropodium caribaeorum*, además de algunas esponjas.

En cuanto a la cobertura de coral, se observa que también hay una dominancia muy marcada de *Porites astreoides*, el cual se distribuye de manera homogénea en toda el área de estudio, seguida de *Porites porites* que se encuentra preferentemente en la zona central. La presencia de especies constructoras arrecifales como *Acropora palmata*, *Acropora cervicornis* y *Montastraea annularis* es prácticamente nula, a pesar de que la primera era una especie que presentaba fuerte dominancia en este sitio (Figura 61).

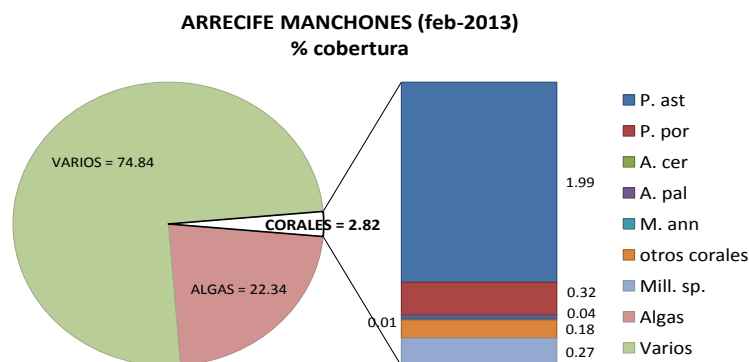


FIGURA 61. Porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en el área de estudio destinada a la restauración activa para el Arrecife Manchones al inicio del proyecto.

Esta proporción de porcentajes de cobertura de los distintos elementos varía un poco entre los distintos cuadros en que se dividió el área de restauración, encontrando que el primer cuadro (A) es el que presenta una mayor cobertura coralina, en comparación con el resto de los cuadros (Figura 62 y Tabla 10).

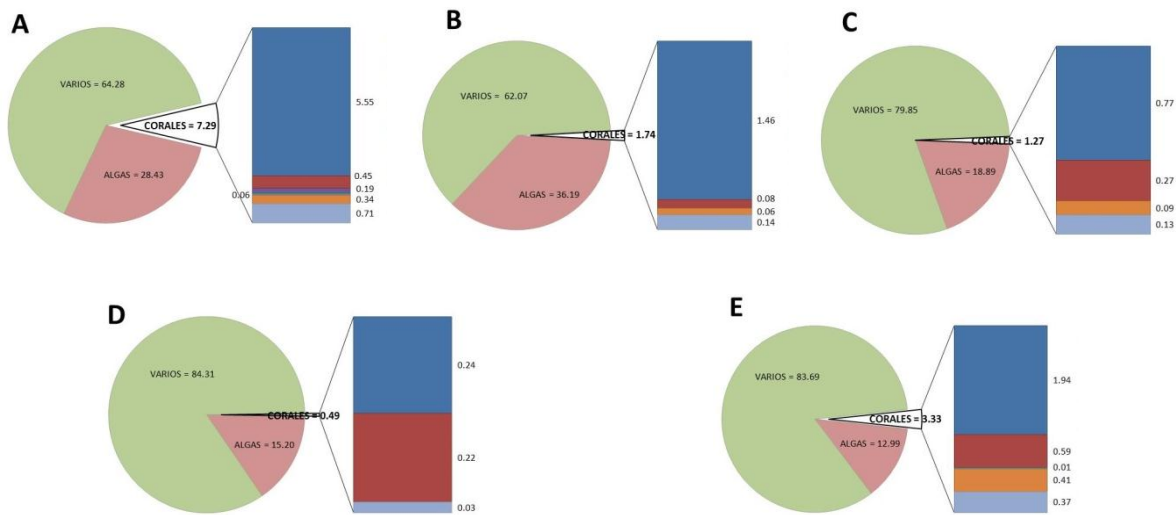


FIGURA 62. Representación gráfica del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Manchones.

TABLA 10. Valores del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Manchones.

Cuadrante	Corales							Algas	Varios
	<i>P. ast</i>	<i>P. por</i>	<i>A. cer</i>	<i>A. pal</i>	<i>M. ann</i>	otros corales	<i>Mill. sp.</i>		
A	5.55	0.45	0.00	0.19	0.06	0.34	0.71	28.43	64.28
B	1.46	0.08	0.00	0.00	0.00	0.06	0.14	36.19	62.07
C	0.77	0.27	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13	18.89	79.85
D	0.24	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	15.20	84.31
E	1.94	0.59	0.00	0.00	0.01	0.41	0.37	12.99	83.69
TOTAL	1.99	0.32	0.00	0.04	0.01	0.18	0.27	22.34	34.42

b) Al término del proyecto

Al término del programa se observa que el sustrato aún se encuentra dominado por macroalgas, estimando un 51.95%, encontrando especies dominantes como *Dyctiota* sp., *Halimeda* sp y rodofitas (algas costosas calcáreas) que forman tapetes sobre el sustrato calcáreo y ayudando a consolidar el sustrato, en menor medida encontramos a *Caulerpa* sp, algas filamentosas, *padina* sp y cianofitas. La cobertura coralina se estimó en un 10.95% del sustrato (incluyendo 1.08% de cobertura de coral de fuego del género *Millepora*), otros organismos bentónicos como corales blandos, esponjas, caracoles, etc., representaron el 12.26% de la cobertura y con respecto al sustrato desnudo (roca ó arena) ocupó un 27.10%. Con respecto a los corales duros el género *Acropora* (*Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*) considerados los principales formadores de arrecife en el Caribe fue el más representativo con un 48%, seguido del género *Porites* (*Porites astreoides* y *Porites porites*) que representó el 39% de la cobertura, el hidrocoral del género *Millepora* obtuvo un 8% con respecto a los demás corales duros, cabe mencionar que aunque dicho género no se encuentra taxonómicamente dentro de los corales escleractíneos tiene funciones y estructura similar por lo que se consideran corales duros. En menor medida y representando un 4% están los corales duros de otras especies que

se consideran aportan menor acreción al arrecife, prácticamente ausente se encuentran las especies del género *Montastrea* y *Orbicella* debido a que ocupan el 1% de la cobertura (Figura 63).

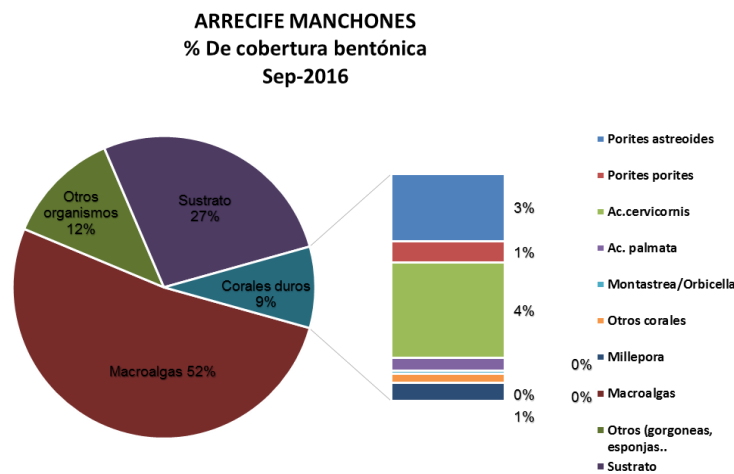


FIGURA 63. Porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en el área de estudio destinada a la restauración activa para el Arrecife Manchones al final del proyecto.

Con respecto a la distribución espacial de las especies en el área de estudio tenemos que *Porites astreoides* y *Porites porites* se distribuyen a lo largo del área de estudio de manera homogénea, en cambio, *Acropora palmata* se concentra casi exclusivamente en la franja de Barlovento cuadrantes (A y B), y *Acropora cervicornis* abarca una zona más amplia incluyendo buena parte de la planicie central y concentrándose hacia la zona de Sotavento, principalmente en los cuadrantes (C, D y E) (Figura 64 y Tabla 11).

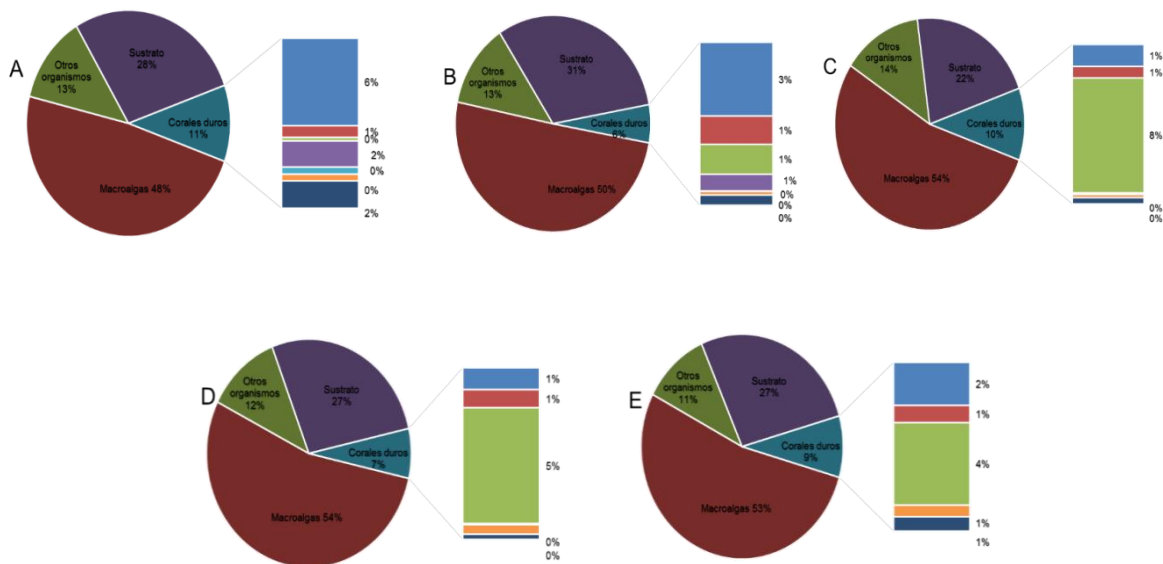


FIGURA 64. Representación gráfica del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Manchones al final del estudio.

TABLA 11. Valores del porcentaje de cobertura de los diferentes elementos en los 5 cuadrantes en que se dividió el área de estudio en Arrecife Manchones al final del estudio.

Cuadrante	Corales							Algas	Varios	Sustrato
	<i>P. ast</i>	<i>P. por</i>	<i>A. cer</i>	<i>A. pal</i>	<i>M. ann</i>	otros corales	<i>Mill. sp.</i>			
A	5.62	0.74	0.23	2.30	1.69	0.40	0.48	48.37	12.64	28.07
B	2.57	0.98	1.04	0.66	0.59	0.13	0.01	50.37	12.60	31.32
C	1.52	0.78	7.92	2.37	0.08	0.24	0.03	53.82	13.60	21.60
D	0.91	0.72	4.74	2.50	0.06	0.38	0.00	53.94	11.73	27.34
E	2.26	0.91	4.29	0.05	0.00	0.61	0.01	53.27	10.74	27.16
TOTAL	2.58	0.83	3.64	1.57	0.48	0.35	0.11	51.95	12.26	27.10

-Comunidad de peces:

Se presenta un análisis de los cambios registrados en la comunidad de peces en Arrecife Manchones. Se observa un incremento en la riqueza específica, con un registro de 17 especies al inicio de la restauración, incrementando a 29 y 37 especies a los 2 años de haber iniciado la siembra de corales, y con 22 especies al terminar el proyecto de restauración. 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 en el 2015, y en el año 2016 5 especies un rangos de abundancia similares a los del 2015 (Tabla 12).

TABLA 12. Abundancia relativa de las especies de peces al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016), en Arrecife Manchones. R=Raro < 1 individuo, E=Escaso=1-5 ind, C=Común=5-10 ind, A=Abundante=10-20 ind. y D=Dominante >20 ind.

Las especies de importancia comercial y ecológica en la región se resaltan en azul.

Familia	Género	Especie	Nombre común	2013	2015-mar	2015-jul	2016-ago	
Acanthuridae	<i>Acanthurus</i>	<i>bahianus</i>	Cirujanos	E	E	R	E	
		<i>chirurgus</i>			C	E		
		<i>coeruleus</i>		E	C	A	E	
Carangidae	<i>Caranx</i>	<i>ruber</i>			R			
Chaetodontidae	<i>Chaetodon</i>	<i>capistratus</i>	Mariposas			R		
		<i>ocellatus</i>			E			
		<i>striatus</i>		R		R		
Diodontidae	<i>Diodon</i>	<i>hystrix</i>				R		
Haemulidae	<i>Anisotremus</i>	<i>virginicus</i>	Roncos			R		
	<i>Haemulon</i>	<i>aurolineatum</i>					E	
		<i>carbonarium</i>		E		C		
		<i>chrysargyreum</i>			A	C		
		<i>flavolineatum</i>		C	D	C	E	
		<i>sciurus</i>		C	C	E	R	
Kyphosidae	<i>Kyphosus</i>	<i>sp</i>		A	E			
Labridae	<i>Bodianus</i>	<i>rufus</i>	Boquinete		E	R		
	<i>Halichoeres</i>	<i>bivitattus</i>			C	E		
		<i>garnoti</i>				A	E	
		<i>maculipinna</i>						R
		<i>radiatus</i>				E	R	
	<i>Thalassoma</i>	<i>bifasciatum</i>		A	C	E	D	
Lutjanidae	<i>Lutjanus</i>	<i>chrysurus</i>	Pargos	D	E	E		
Malacanthidae	<i>Malacanthus</i>	<i>plumieri</i>				R		
Mullidae	<i>Mulloidichthys</i>	<i>martinicus</i>				R		
Ostraciidae	<i>Lactophrys</i>	<i>triqueter</i>				R		
Pomacanthidae	<i>Holacanthus</i>	<i>ciliaris</i>	Ángeles y Damiselas				E	
		<i>tricolor</i>					R	
	<i>Pomacanthus</i>	<i>arcuatus</i>			E	R	R	
		<i>paru</i>			E	R		
Pomacentridae	<i>Abudefduf</i>	<i>saxatilis</i>			A	D	A	E
	<i>Chromis</i>	<i>cyanea</i>			C	C	E	A
	<i>Microspathodon</i>	<i>chrysurus</i>			C	C	E	C
	<i>Stegastes</i>	<i>diencaeus</i>						
		<i>fuscus</i>						C
		<i>partitus</i>		E	E	R	E	
		<i>planifrons</i>		C	E	R		
Scaridae	<i>Scarus</i>	<i>croicensis</i>	Loros		E	R		
		<i>taeniopterus</i>		R	C	R	E	
	<i>Sparisoma</i>	<i>atomarium</i>			E	E	E	
		<i>aurofrenatum</i>		E	C	E	E	
		<i>chrysopterygum</i>		E	E	E	E	
		<i>rubripinne</i>		E	E	E	E	
<i>viride</i>			A	E	E			
Serranidae	<i>Epinephelus</i>	<i>cruentatus</i>	Mero		E	R	R	
Sphyraenidae	<i>Sphyraena</i>	<i>barracuda</i>	Barracuda				R	
Número de especies				17	29	37	22	

La densidad de peces en este arrecife se estimó alrededor de 0.7 ind/m² en promedio al inicio de la restauración, mostrando un incremento significativo durante el año 2015 (0.81 ind/m² en marzo y 3.69 ind/m² en julio). Sin embargo, en el muestreo que se realizó en agosto del 2016 se observó una densidad promedio de 0.75 ind/m² (Figura 65).

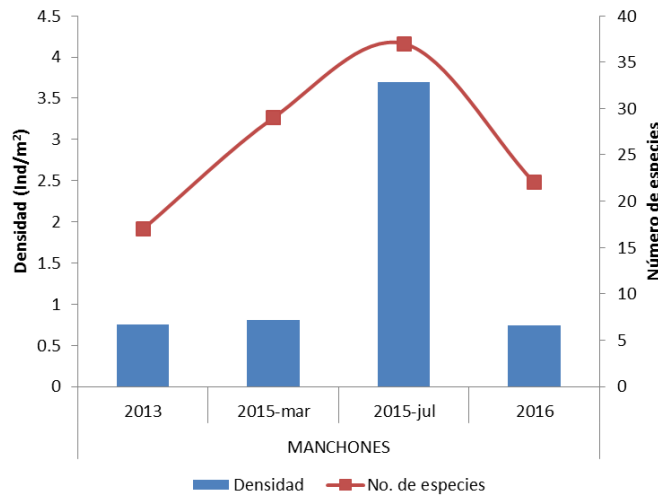


FIGURA 65. Cambios en la densidad y riqueza específica de peces en Arrecife Manchones, al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016).

La estructura de tallas en Arrecife Manchones muestra un incremento de organismos de la clase II durante el año 2015, asociado a la presencia de cardúmenes de peces que también incrementaron el valor de densidad en esos muestreos. La proporción de tallas en el 2016, al final de la restauración, muestra una mayor proporción de individuos de tallas mayores, teniendo presencia de organismos de la talla VI, siendo especies de niveles tróficos superiores (Figura 66).

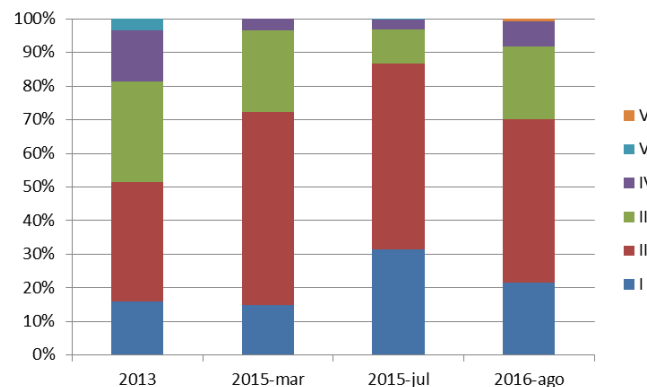


FIGURA 66. Estructura de tallas para la comunidad de peces en Arrecife Manchones, al inicio de la restauración (2013), durante las actividades de siembra (2015) y al final de la restauración (2016).

I=<5 cm, II=5-10cm, III=10-20cm, IV=20-30cm; V=30-40cm; VI=>40cm.

4.2. Restauración

4.2.1. Eventos de siembra para la restauración activa en 2 sitios:

El proyecto estuvo programado para llevar a cabo una siembra inicial y 5 siembras subsecuentes, las cuales se llevaron a cabo como se menciona a continuación.

a) Siembra inicial:

Esta actividad consistió en la siembra de un lote colonias que existían en el vivero de coral previo al inicio de este proyecto, trasplantando 300 colonias en cada uno de los sitios de restauración; lo cual se llevó a cabo al final de la 2ª etapa del proyecto, con lo que se cumplió con el **100%** de avance del proyecto.

En la segunda etapa del proyecto se realizó la primera siembra de colonias de coral en las áreas de restauración durante el mes de septiembre. Se eligieron las colonias con mejor crecimiento en el vivero de coral y se trasladaron a los sitios para su trasplante. Se lograron colocar 300 colonias en Cuevones y 300 colonias en Manchones. La especie que se utilizó en esta etapa fue *Acropora cervicornis* ya que fueron las colonias con mejor crecimiento en el vivero de coral. En esta primera siembra, las colonias se fijaron en los primeros 2 cuadrantes del área a restaurar en ambos sitios.

b) Siembras subsecuentes:

Las siembras subsecuentes se realizaron con colonias producidas en el vivero durante la ejecución del presente proyecto. La primera siembra subsecuente se realizó en la 3ª etapa; y en la 7ª etapa se realizó la quinta siembra subsecuente. Esta actividad se concluyó al **100 %**, ya que se realizaron 5 de las 5 siembras programadas para todo el proyecto.

A finales de la tercera etapa se inició el programa de siembras semestrales. Durante el mes de mayo se llevó a cabo el primer evento en donde se realizó la siembra de 180 colonias en cada uno de los sitios de restauración. Se eligieron las colonias con mejor crecimiento en el vivero de coral y se trasladaron a los sitios de restauración para su siembra. Se trasplantaron 180 colonias en Cuevones y 180 colonias en Manchones de diferentes especies de acuerdo a lo reportado en la Tabla 13. La siembra en esta etapa se llevó a cabo en los cuadrantes 4 y 5 del área de restauración de cada sitio.

En la cuarta etapa la siembra se llevó a cabo en los cuadrantes C, D y E del área de restauración de cada sitio. La siembra se realizó durante el mes de agosto del 2014 en Arrecife Cuevones, colocando 77 colonias de *Montastraea cavernosa* y 24 de *Orbicella annularis* en los 3 últimos cuadrantes del área de restauración. En Arrecife Manchones se realizaron varias siembras en los meses de julio y agosto, colocando 180 colonias de *Porites porites* y 133 de *Undaria agaricites* en los 3 últimos cuadrantes del área de restauración.

En la quinta etapa, la siembra en Arrecife Cuevones se llevó a cabo en los cuadrantes A, B y F. En el mes de febrero 2015 se realizó la translocación de 20 reclutas sexuales que provienen fueron producidos en el proyecto en los años 2012 y 2013. Estos reclutas fueron producidos y cuidados en los acuarios de UNAM/Xcaret y sembrados el 11 de febrero del 2015 en el área de restauración en Arrecife Cuevones, fijando 11 fragmentos en el cuadrante A y 9 en el B. Adicionalmente, en el mes de marzo 2015, se realizó la siembra de 22 colonias de la especie *Orbicella annularis* provenientes del Acuario del

SCE de INAPESCA y 65 colonias de *Acropora palmata* del vivero marino en Bajo Pepito en el cuadrante A. Además, se realizó la siembra de 85 colonias de *Acropora cervicornis* provenientes de Bajo Pepito, las cuales se sembraron fuera del área de restauración (cuadrante F), ya que la densidad de colonias de esta especie en el resto del área es abundante. Para Arrecife Manchones, la siembra de las colonias de las especies *Orbicella annularis* y *Acropora palmata* se realizó en el cuadrante A, en donde no se había realizado siembras anteriores, por ser la parte más somera del área. El total de colonias de *A. cervicornis* fueron sembradas en el cuadrante E.

En la sexta etapa, se sembraron 90 colonias de *Acropora palmata* en los cuadrantes A y B, y 90 colonias de *Acropora cervicornis* en los cuadrantes D y E, tanto para Arrecife Cuevones como para Arrecife Manchones.

En la séptima etapa se realizó el quinto evento de siembra subsecuente, con 188 colonias en Cuevones: 31 colonias de *A. palmata* que se sembraron en los cuadros A y B; 48 colonias de *M. cavernosa* y 37 de *O. annularis* que se sembraron a lo largo del área de restauración (principalmente en los cuadros B, C y D). En Arrecife Manchones se sembraron 186 colonias: 34 colonias de *A. palmata* en los cuadros A y B, 26 colonias de *M. cavernosa* y 56 de *O. annularis* se sembraron a lo largo del área de restauración (principalmente en los cuadros B, C y D).

El registro de siembra de todo el proyecto se muestra en la Tabla 2.

TABLA 13. Registro de siembra de colonias de coral para la Restauración activa de 2 áreas arrecifales.

Etap	Fecha	Sitio	A. cer	A. pal	M. cav	O. ann	P. por	U. aga	Total
1 ^a	2012								0
2 ^a	oct-13	Cuevones	300						300
	sep-13	Manchones	300						300
3 ^a	may-14	Cuevones	155			25			180
	mar-14	Manchones	110				70		180
4 ^a	ago-14	Cuevones			77	24			101
	jul/ago-14	Manchones					180	133	313
5 ^a	feb/mar-15	Cuevones	85	85		22			192
	Mar-15	Manchones	67	118		22			207
6 ^a	15-jul-15	Cuevones	90	90					180
	14-jul-15	Manchones	90	90					180
7 ^a	07-abr-16	Cuevones	72	31	48	37			188
	08-abr-16	Manchones	70	34	26	56			186

4.2.3. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas:

Esta actividad se realizó al 100%, ya que se realizaron los 9 registros programados, de acuerdo a las fechas que se especifican en la sección 3.2.3.

Se presenta un análisis de sobrevivencia y una comparación de crecimiento de las colonias sembradas en las áreas de restauración.

Sobrevivencia:

a) Arrecife Cuevones:

En Arrecife Cuevones se realizó la siembra de 4 especies de coral. Se inició con *Acropora cervicornis*, teniendo muy buena sobrevivencia durante los primeros 7 registros, con una tasa de sobrevivencia superior al 90%; pero en los 2 últimos registros (año 2016) se estimó una reducción en la sobrevivencia. En cambio, *Acropora palmata*, mantuvo una tasa de crecimiento mayor al 98% en todos los registros. La especie *Orbicella annularis* ha mostrado una tasa de sobrevivencia superior al 90%, aunque se aprecia una tendencia a disminuir con el tiempo. En el caso de *Montastraea cavernosa*, la sobrevivencia fue prácticamente del 100%, a excepción del último registro en donde se detectó una disminución al 98% (Figura 67).

Cabe resaltar que el número de colonias cuya marca no pueden ser identificadas en campo incrementó en forma paulatina a lo largo de los registros, ya que las marcas se perdieron, se incorporaron al sustrato, o eran ilegibles: y algunas veces hasta se observó el crecimiento de la colonia sobre las marcas. Esto es una situación normal, por el paso del tiempo y el efecto sobre las marcas.

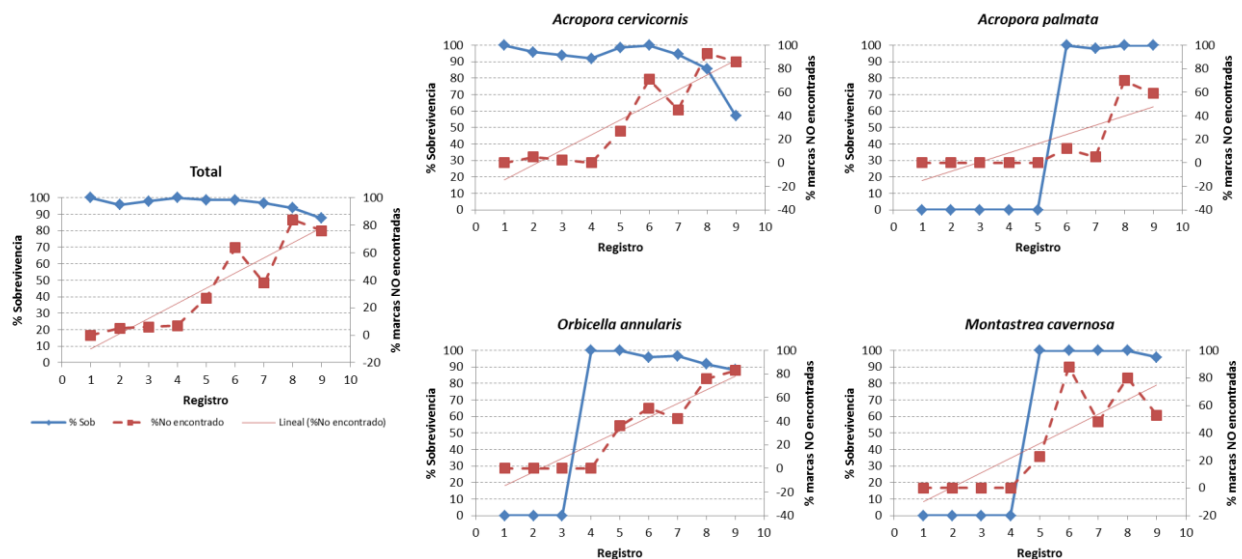


FIGURA 67. Porcentaje de sobrevivencia de las colonias de coral sembradas en Arrecife Cuevones a lo largo del proyecto. La línea roja muestra el porcentaje de colonias cuya marca no fue encontrada. Registros: 1 (nov 2013), 2 (mar 2014), 3 (abr 2014), 4 (jun 2014), 5 (sep 2014), 6 (abr 2015), 7 (jul 2015), 8 (abr 2016), 9 (jul 2016).

b) Arrecife Manchones:

En Arrecife Manchones se realizó la siembra de 6 especies de coral. Para el caso de *Acropora cervicornis* y *A. palmata*, la situación es similar que para Arrecife Cuevones. La siembra en este sitio también se inició con *Acropora cervicornis*, teniendo muy buena sobrevivencia durante los primeros 7 registros, teniendo una tasa de sobrevivencia superior al 90%; pero en los 2 últimos registros (año 2016) se estimó una reducción en la sobrevivencia. La especie *Acropora palmata*, mantuvo una tasa de sobrevivencia mayor al 95% en todos los registros. Las especies *Orbicella annularis* y *Montastraea cavernosa* mostraron una tasa de sobrevivencia del 100%. Para la especie *Porites porites* se tuvo una tasa mayor al 97% hasta el registro 7, y posteriormente se registró un decremento en su sobrevivencia. Para la especie *Undaria tenuifolia* se tuvo una sobrevivencia mayor al 90% hasta el registro 7, y posteriormente se registró un decremento importante, y en los últimos registros ya no se ha podido detectar las colonias marcadas de estas, debido a que se pierden entre el sustrato donde están creciendo (Figura 68).

Del mismo modo que para Arrecife Cuevones, el número de colonias que no pueden ser identificadas en campo incrementó a lo largo de los registros por pérdida de marcas, por incorporarse al sustrato o ser ilegibles. Esto es una situación normal, por el paso del tiempo y el efecto sobre las marcas.

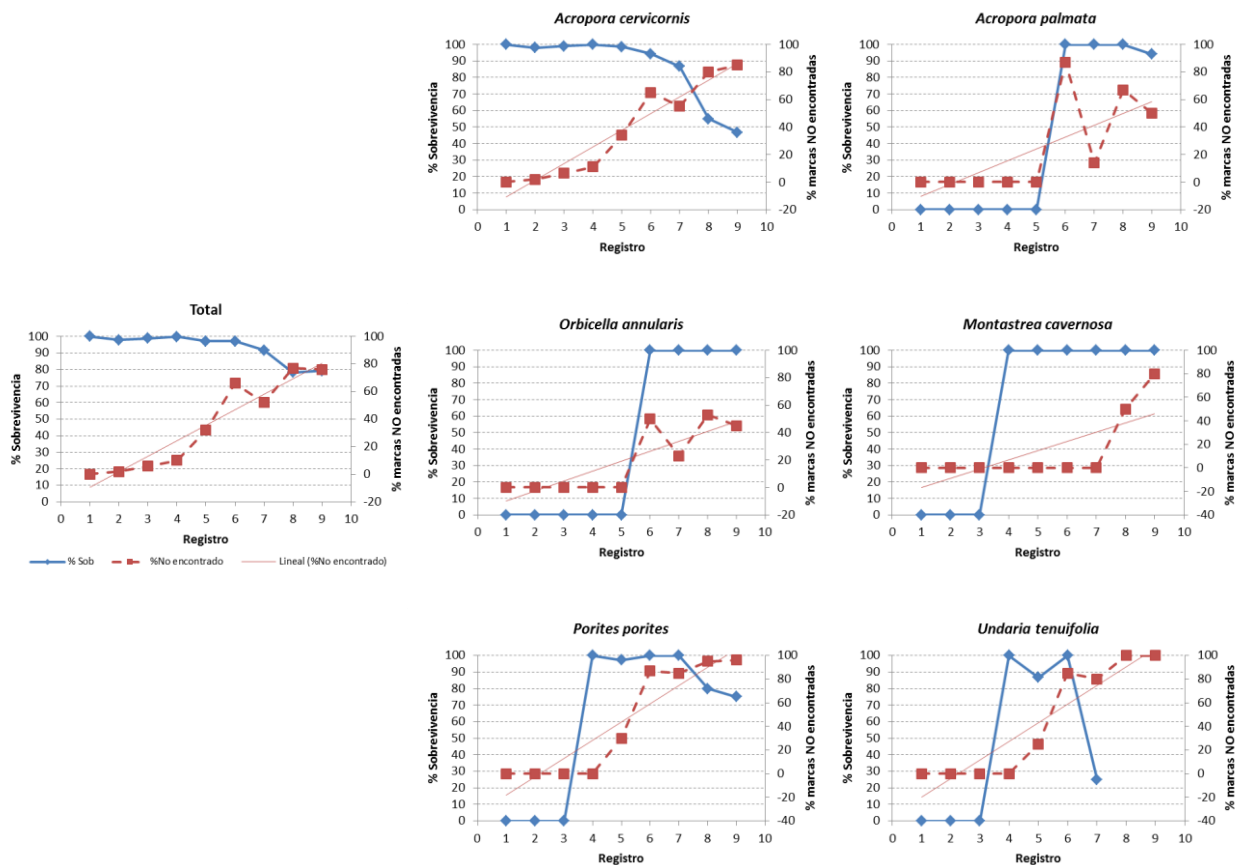


FIGURA 68. Porcentaje de sobrevivencia de las colonias de coral sembradas en Arrecife Manchones a lo largo del proyecto. La línea roja muestra el porcentaje de colonias cuya marca no fue encontrada. Registros: 1 (nov 2013), 2 (mar 2014), 3(abr 2014), 4(jun 2014), 5 (sep 2014), 6 (abr 2015), 7 (jul 2015), 8 (abr 2016), 9 (jul 2016).

Crecimiento:

a) Arrecife Cuevones:

Se observa un crecimiento gradual en el tamaño de las colonias fijadas y marcadas en el área de restauración de Arrecife Cuevones. En el caso de la especie *Acropora cervicornis*, el tamaño promedio de la muestra incluye a las colonias que se sembraron en esa etapa, más las que se habían sembrado en etapas anteriores. Por ello, el incremento entre etapas a veces no es muy notorio, ya que las nuevas colonias sembradas son de tamaño más pequeño que las colonias ya existentes en el área. Sin embargo se logra ver un incremento paulatino, de casi 1 cm por etapa. El caso de *A. palmata* la altura promedio muestra un incremento más notorio y gradual, teniendo una desviación estándar más grande en cada etapa, debido a la diferencia de tamaños entre las colonias recién sembradas y las que se sembraron en etapas anteriores.; teniendo un incremento de casi 4 cm en la altura promedio de estas especies durante 4 eventos de medición. Para las especies *Montastraea cavernosa* y *Orbicella annularis* se registraron variaciones entre las etapas, sobre todo por la muestra de colonias que se midieron en cada caso, que no fue siempre la misma (Figura 69).

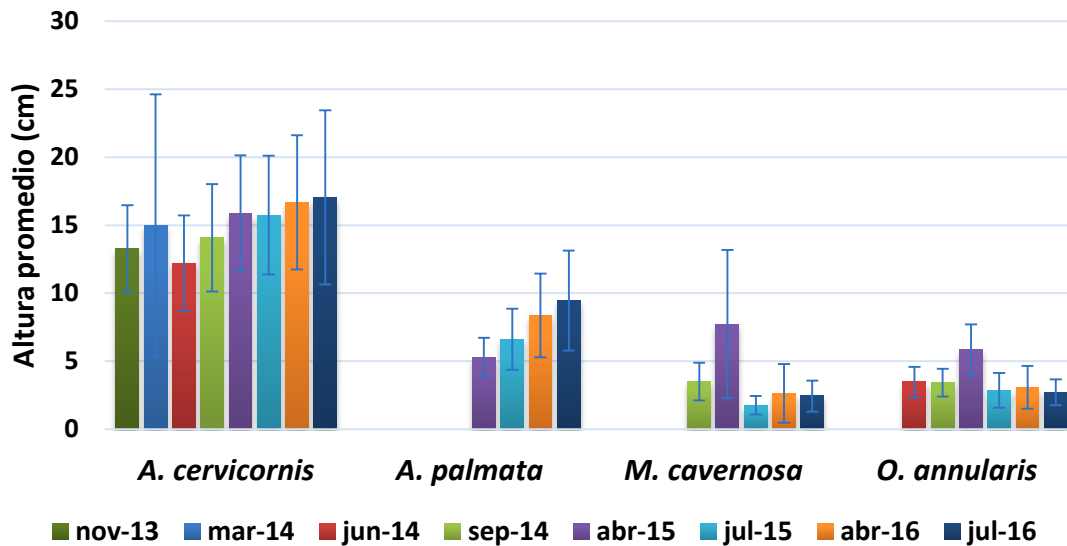


FIGURA 69. Comparación de altura de las colonias sembradas en Arrecife Cuevones

b) Arrecife Manchones:

En Arrecife Manchones la situación es similar que en Cuevones. Las colonias de *Acropora cervicornis* mostraron un crecimiento paulatino hasta abril del 2015, llegando a una altura promedio máxima de 18.5 cm, y a partir de ahí se mantuvo el tamaño de las colonias en un rango de 16 a 18 cm. Esto se debe a que el crecimiento de esta especie, al ser ramificada, no alcanza tallas más grandes, sino que empieza a crecer hacia los lados. *Acropora palmata* también presentó un incremento constante durante los 4 registros. *Montastraea cavernosa* y *Orbicella annularis* mostraron variaciones en la altura promedio a lo largo del tiempo, debido también a que la muestra fue diferente en cada ocasión. El tamaño de las colonias de *Porites porites* también fluctuó entre los 6 y 9 cm de alto, debido a que sus colonias en forma digitiforme no alcanza alturas muy grandes, sino que se va extendiendo en el sustrato. Las colonias de *Undaria tenuifolia* mostraron un

crecimiento paulatino hasta la fecha en la que se podían reconocer las marcas para su medición (Figura 70).

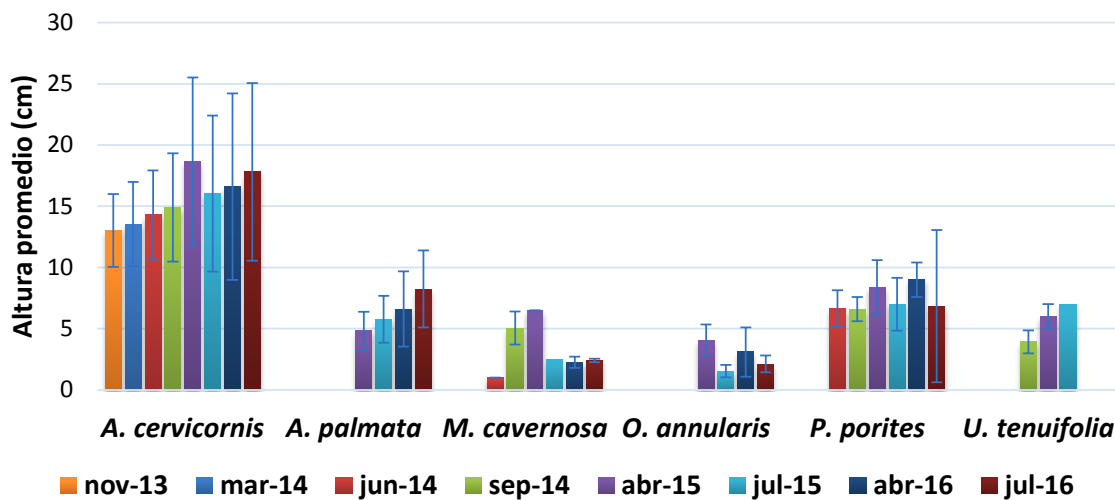


FIGURA 70. Comparación de altura de las colonias sembradas en Arrecife Manchones

4.2.4. Registro fotográfico de áreas restauradas:

Se realizaron 8 registros fotográficos de las áreas restauradas, de acuerdo a lo programado en el proyecto. Se logró un avance del **100 %** de esta actividad, habiendo concluido 7 registros programados en el proyecto, más el registro inicial antes de la siembra que no estaba contemplado en el cronograma. Las fechas de los registros se muestran en la sección 3.2.4.

a) Cuevones:

El Arrecife Cuevones originalmente presentaba una escasa cobertura coralina siendo ésta dominada el género *Porites*, siendo especies pioneras de crecimiento incrustante que no contribuyen en gran medida a la acreción de la estructura arrecifal. Sin embargo, también se registró la presencia de corales constructores arrecifales como las del género *Acropora*, y en menor medida del género *Montastraea* y *Orbicella*. La restauración en este sitio ha consistido principalmente en incrementar la cobertura de *Acropora cervicornis*, trabajando hasta este momento en los cuadrantes B, C, D y E, incrementando cada vez más su densidad y cobertura. En la siembra anterior se empezó a trabajar con colonias de crecimiento masivo como las del género *Montastraea*, logrando un incremento en su presencia sobre el costado de Sotavento de la estructura. Durante ésta etapa se continuó con la introducción de *Acropora palmata*, principalmente en el cuadro También se continuo incrementando la densidad y cobertura de *A. cervicornis* en los cuadrantes B y D (Figuras 71a).

b) Manchones:

En Arrecife Manchones la situación inicial era de una muy baja cobertura coralina, y solamente con presencia del género *Porites*. La restauración en este sitio se ha enfocado básicamente a la siembra de *Acropora cervicornis* en las primeras etapas, debido a que era la especie abundante en este lugar, y a partir de la 4ª etapa se trabajó en la siembra de colonias que forman camas de coral de las especies *Porites porites* y *Undaria*

agaricites. Para la 5ª etapa se inició la siembra de colonias de *Acropora palmata* y *Orbicella annularis* en el cuadro A del área de restauración, reforzando además la densidad y cobertura de *Acropora cervicornis* en el cuadro E. En esta 8ª etapa se continuó con la siembra de colonias de *Acropora palmata* en los cuadrantes A y B, y de *Acropora cervicornis* en el cuadro E (Figuras 21b). Durante la séptima y octava etapa se realizaron siembras de *Acropora cervicornis* en los cuadrantes A y B y *Acropora palmata* en los cuadrantes D y E. (Figuras 71b).

La comparación de los mosaicos de cobertura a lo largo del tiempo se muestra en la sección 6, donde se presenta el análisis de avance de todo el proyecto.

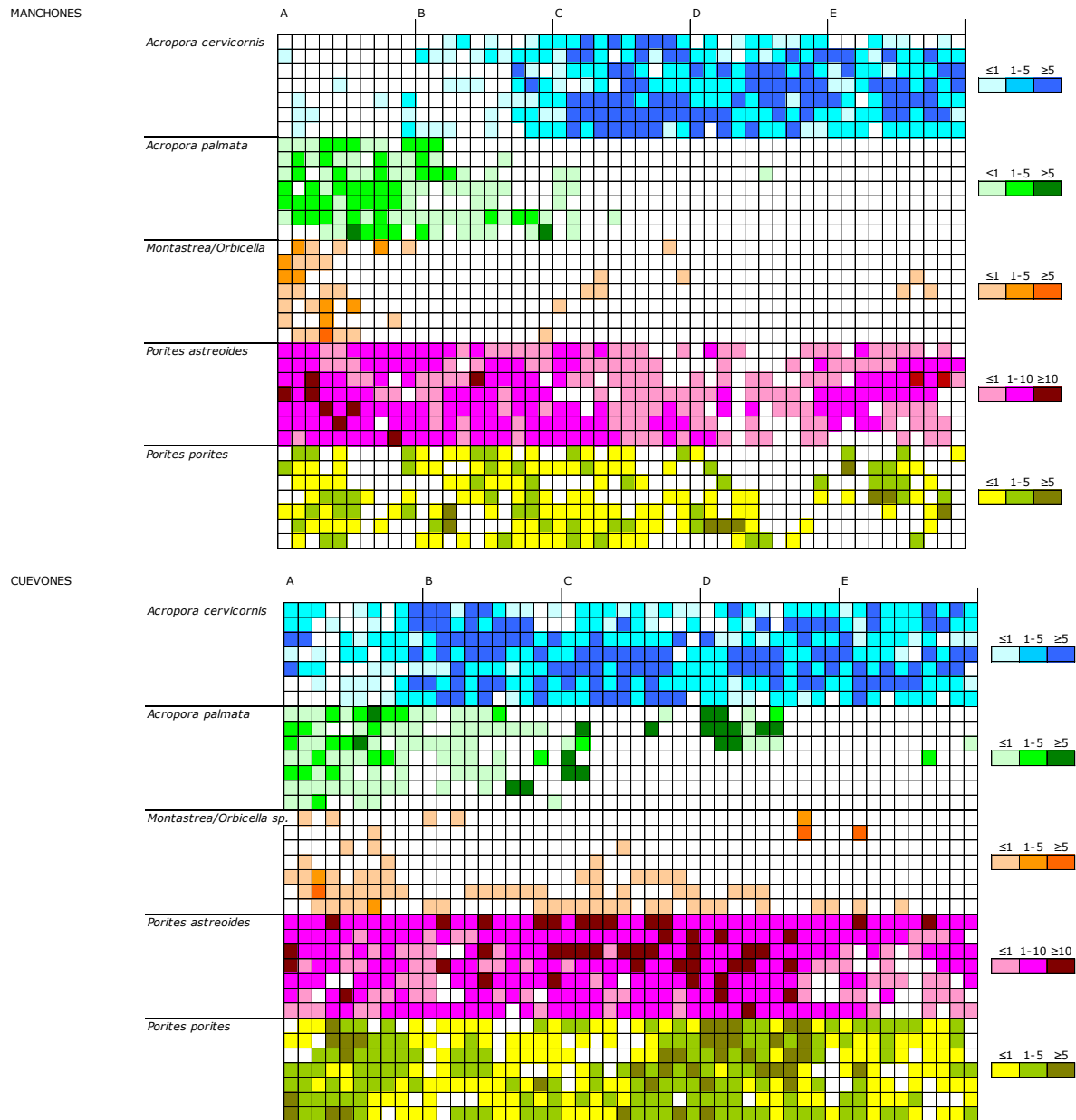


FIGURA 71. Mosaico de cobertura relativa de corales por especie en sitios de restauración en el Registro VII. Arrecife Cuevones (arriba) y Arrecife Manchones (abajo).

Adicionalmente se estimaron los porcentajes de cobertura por elemento biótico de la comunidad arrecifal, considerando las macroalgas, los corales, el sustrato y otros elementos (gorgonaceos, esponjas, etc). Este análisis se realizó para cada uno de los 5 cuadros del área de restauración de ambos sitios. El resultado global para cada uno de los sitios se muestra en la Figura 72.

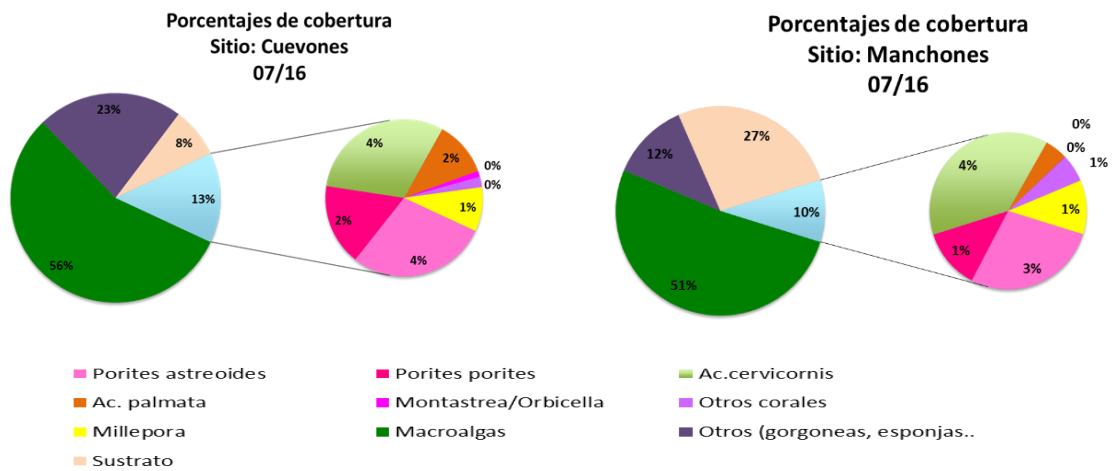


FIGURA 72. Porcentaje de cobertura por elemento biótico en los sitios de restauración en el Registro VII. Arrecife Cuevones (izq) y Arrecife Manchones (der).

4.3. Acuarios

4.3.1. Instalación de sistemas de cultivo de corales exteriores (SCE)

La instalación de los SCE se concluyó en la 1ª etapa del proyecto, con lo que se cumplió con el 100% del avance del proyecto.

a) Limpieza del área:

Para iniciar las modificaciones del área fue necesario realizar una limpieza del sitio para retirar materiales y basura, así como quitar la arena acumulada en el piso de cemento.

b) Acondicionamiento del techo para permitir el paso de la luz solar:

El área originalmente estaba cubierta con un techo de láminas de asbesto montadas sobre una estructura metálica. Con la finalidad de hacer propicia el área para el cultivo de corales fue necesario modificar el techo para permitir un paso de luz solar atenuado. Para ello se retiraron las láminas de asbesto del área donde se instalarían las tinas, dejando un tercio del techo con láminas como área de trabajo. Se reparó la estructura metálica que sostiene el techo, para lo cual se lijó la pintura vieja y las partes oxidadas, se aplicó un primario y luego una pintura de aceite a toda la estructura. Posteriormente se colocó una malla sombra con reducción de luz de un 30% y se colocó en lienzos dobles. De este modo el área del SCE tiene un techo que permite la atenuación entre un 35-45% de la luz solar sobre el área de las tinas de cultivo, y una superficie con sombra para el área de trabajo, en donde se colocó una mesa (Figura 73).



FIGURA 73. Techo de malla sombra para cubrir el área de los SCE.

c) Cercado del área de SCE:

Para delimitar el área de los SCE se construyó un cercado de malla ciclónica sobre un murete de barda de block, y una puerta de acceso. Esta cerca incluye la plancha de concreto sobre la que se encuentran las tinas de cultivo, así como una parte de arena en donde se pueden colocar otros sistemas de cultivo. Cabe mencionar que este trabajo se realizó con presupuesto del INAPESCA (Figura 74).



FIGURA 74. Cercado del área de los Sistemas de cultivo exteriores.

d) Fabricación de muretes para soporte de tinas:

Para el soporte de las 8 tinas medianas fue necesario llevar a cabo la construcción de muretes con block repellado y pintado. Para la colocación de las 2 tinas grandes se realizó el acarreo de block y el armado del soporte de las tinas de cultivo y del tanque de ola.

e) Acondicionamiento de tinas para cultivo:

Se llevó a cabo una remodelación de las tinas existentes para habilitar estanques más adecuados para el cultivo de corales. Originalmente se contaba con 12 canaletas de tamaño pequeño (1.60 x 0.45 x 0.35) con una capacidad de 230 litros, y se decidió unir 2 piezas para formar 6 tinas medianas (1.60 x 0.90 x 0.35) con una capacidad de 460 litros, las cuales tienen un tamaño y forma más conveniente para el cultivo. Adicionalmente se contaba con 2 tinas medianas que se habían habilitado anteriormente con este mismo propósito, de modo que se cuenta en total con 8 tinas medianas para el área de los SCE con una capacidad de 3,680 litros (Figura 75).



FIGURA 75. Modificación de tinas para el SCE.

Adicionalmente se decidió reubicar 2 sistemas de cultivo grandes (1,800 litros cada uno) de los 4 que estaban del área de SCC. De este modo, el área de SCE tiene estanques con un volumen total de 7,280 litros.

f) Instalación hidráulica para abastecimiento de agua marina a los SCE:

Se realizó la instalación de tubería hidráulica desde el reservorio de agua marina hacia los sistemas de cultivo, instalando un tinaco elevado de 750 litros para suministro por gravedad. También se colocó la instalación hidráulica de abastecimiento de agua para las tinas de cultivo, así como para su desagüe (Figura 76 izq.).

g) Abastecimiento de agua dulce y fabricación de lavabo:

Adicionalmente se instaló una línea de agua dulce para abastecimiento al área de los SCE, y se fabricó un lavabo de concreto para lavar el material del área (Figura 76 der.).



FIGURA 76. Instalación hidráulica de abastecimiento y desagüe para tinas de cultivo del SCE (izq.) y Lavabo con suministro de agua dulce (der.).

h) Pruebas de flujo de agua para regular la tasa de recambio de agua diario:

Se realizaron pruebas para determinar el flujo de recambio de agua y ajustar las válvulas de entrada de las tinas. Se midieron los flujos, hasta obtener un recambio de agua total cada 2 horas. Este flujo se ira adecuando en función de la cantidad de colonias en cultivo.

i) Instalación de sistemas de cultivo de Artemia.

Dentro del área del SCE se instalaron 4 tinas para cultivo de Artemia, en donde se mantendrá para su crecimiento y engorda, con la finalidad de contar con un alimento de mayor tamaño (Figura 77).



FIGURA 77. Tinas para cultivo de *Artemia*.

j) Modificación del sistema de suministro de agua marina.

Debido al incremento en la capacidad de los cultivos en el CRIP Puerto Morelos del INAPESCA fue necesario llevar a cabo una modificación en el suministro de agua marina para tener mayor captación de volumen de agua. La modificación consistió en hacer una reparación del reservorio enterrado para agua marina para succión del agua en lugar del llenado por gravedad que tenía originalmente. Para ello se colocó un sifón en la tubería para mayor entrada de agua y se instaló una bomba tipo jacuzzi de 1 HP fuera del reservorio de almacenamiento que se encuentra enterrado en la playa, con la finalidad de incrementar la velocidad de llenado y el volumen de agua entrante por unidad de tiempo. También fue necesario instalar un tinaco de 750 litros en una torre elevada para suministrar agua por gravedad al área de los SCE. De este modo, el agua del reservorio de agua marina que se encuentra enterrado en la playa bombea agua tanto al tinaco elevado que abastece el área de SCE, así como a los tinacos que se encuentran dentro del área de acuarios para los SCC (Figura 78).



FIGURA 78. Modificaciones a la línea de abastecimiento de agua marina existente. Instalación de un tinaco elevado (izq) y de una bomba en reservorio de agua marina enterrado (der).

Sin embargo, ya en funcionamiento del sistema se detectó la necesidad de incrementar el volumen de captación de agua para el abasto requerido, por lo que para la 2ª etapa se solicitó un cambio de presupuesto para adaptar un reservorio de agua más grande sobre tierra para aumentar el volumen de agua marina almacenada, requiriendo la instalación de una bomba alterna, la cubierta aislante del estanque y un techo para los tinacos, para evitar el incremento de temperatura.

k) Producción de alimento vivo:

La producción de alimento vivo para el cultivo de corales consiste en la producción de nauplios de artemia y rotíferos, y para estos últimos se cultiva microalga para su alimentación.

Se obtuvo una nueva sepa de rotíferos de la especie *Brachionus plicatilis*, los cuales se alimentan con microalga *Tetraselmis chuii*. Los rotíferos se alimentan cada 3 a 4 días, con 50-100 ml por litro de cultivo, dependiendo de la coloración del cultivo de microalgas. Los cultivos de microalgas fueron desdoblados de acuerdo a la concentración de su coloración, cada semana, al mismo tiempo se les agregó medio de cultivo F2 en una proporción de 0.16 ml parte A y 0.16 ml parte B por cada litro de cultivo. Para los casos en los que los cultivos se observaron muy pálidos, se les aplicó medio F2 de Guillard en la misma proporción cada que fue requerido (Figura 79).



FIGURA 79. Laboratorio de producción de alimento vivo para cultivo de corales.

4.3.2. Acondicionamiento de sistemas de cultivo controlados (SCC)

El acondicionamiento de los SCC se concluyó en la 1ª etapa del proyecto, con lo que se cumplió con el 100% del avance del proyecto.

Con la ejecución del proyecto se reactivaron 4 módulos de cultivo para corales con 1,800 litros de capacidad; 2 se mantuvieron dentro del área de acuarios para su manejo como sistemas de cultivo controlados (SCC), y 2 se transfirieron al área de sistema de cultivo externo (SCE) (Figura 80).



FIGURA 80. Sistemas de cultivo con simulador de ola. Se rehabilitaron 2 módulos dentro del área de SCC (izq.), y se transfirieron 2 módulos dentro del SCE (der.).

Esta decisión permite maximizar el tiempo de funcionamiento de los módulos en el acuario como Sistemas de Cultivo Controlados (SCC) para su manejo con flujo cerrado, iluminación artificial, sistema de filtración y simulador de ola, teniendo las refacciones de bombas y focos necesarias para su funcionamiento por el tiempo que dura el proyecto. Cada uno de estos módulos utiliza un set de 5 focos, cuya vida útil es de 10 a 18 meses, y el suministro de bombas para recirculación de agua y espumadores. Estos sistemas se destinarán para el mantenimiento de organismos bajo condiciones controladas como son

los reclutas sexuales y colonias bajo aclimatación y/o experimentación. Siendo así, otros 2 módulos permanecerán en el área de Sistemas de Cultivo Externo (SCE) para incrementar la producción de corales en el vivero, en donde su funcionamiento representa un ahorro de energía por el uso de iluminación natural y flujo continuo.

4.3.3. Rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo

La rutina para el mantenimiento de corales en cultivo se llevó a cabo de forma cotidiana durante todo el proyecto, con lo que se logró un avance del 100% del proyecto.

a) Rutina cotidiana de mantenimiento del SCE:

Se llevó a cabo el mantenimiento rutinario de los acuarios instalados en el SCE (Figura 81), el cual consiste básicamente en las siguientes actividades:

- Calidad de agua en el sistema (diariamente)
 - Recambio del 50% del volumen de agua
- Medición y registro de parámetros físico-químicos (3 veces por semana) (Tabla 14):
 - Salinidad
 - Temperatura
 - Incidencia de luz
 - Flujo de agua corriente en sistema abierto
- Actividades de limpieza del sistema (1 vez por semana):
 - Limpieza de las paredes de la canaleta para eliminar algas incrustantes
 - Remoción de sedimentos acumulados en el fondo de la canaleta
 - Limpieza de las bases de las colonias en cultivo, así como de los soportes.
- Mantenimiento y operación del sistema (Mensual):
 - Limpieza de tinacos elevados
 - Limpieza de reservorios de almacenamiento de agua marina
 - Limpieza de bombas de succión de agua de mar
 - Desmontar y Montar bombas y sopladores para realizar mantenimiento preventivo
 - Reparaciones menores según requerimiento

Nota: Al final del proyecto se consolida el uso de caracoles como grupo herbívoro en los sistemas de cultivo ya que evitan el sobrecrecimiento de algas verdes filamentosas, no compiten intraespecíficamente y los desechos no repercuten en la salud del coral. La integración de grupo herbívoro y filtración de agua permitió disminuir el esfuerzo en la limpieza, el estrés por manipulación, el daño directo al borde de crecimiento de los corales y los eventos de limpieza de 2 a 1 por semana.

TABLA 14. Parámetros críticos a controlar en el acuario para cultivo de corales, y sus valores de referencia recomendados por Holmes F. Randy (2008).

Parámetro	Recomendación para acuario de arrecife	Valor típico en el agua marina superficial
Calcio	380-450 ppm	420 ppm
Alcalinidad	2.5-4 meq/L 7-11 dKH 125-200 ppm CaCO ₃ equivalentes	2.5 meq/L 7 dKH 125 ppm CaCO ₃ equivalentes
Salinidad	35 ppt gs = 1.026	34-36 ppt gs = 1.025-1.027
Temperatura	76-83° F	Variable ²
pH	7.8-8.5 OK 8.1-8.3 es mejor	8.0-8.3 (puede ser mayor o menor en lagunas)
Magnesio	1250-1350 ppm	1280 ppm
Fosfato	< 0.03 ppm	0.005 ppm
Amonio	<0.1 ppm	Variable (típicamente <0.1 ppm)
Silicio	< 2 ppm, mucho menor si las diatomeas son un problema	<0.06 - 2.7 ppm
Iodo	No se recomienda su control	0.06 ppm total en todas sus formas
Nitrato	< 0.2 ppm	Variable (típicamente menor a 0.1 ppm)
Nitrito	< 0.2 ppm típicamente	Variable (típicamente menor a 0.0001 ppm)
Estroncio	5-15 ppm	ppm

b) Esquema de alimentación:

El esquema de alimentación para los cultivos de corales vivos consiste en el suministro de alimento vivo (Rotíferos y nauplios de Artemia) combinados con suplementos químicos que se utilizan en acuarismo especiales para corales (Figura 81). El esquema de alimentación fue el que se indica en la Tabla 15.

TABLA 15. Esquema de alimentación de fragmentos de coral mantenidos en sistema exterior.

Tipo de alimento		Dosis	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa
Alimento vivo	Rotífero	30 ml						
	Nauplio de Artemia	30 ml						
Producto acuarístico	Coral accel	30 ml						
	Microvert	15 ml						
	Iodine	15 ml						

Coral accel: proporciona las proteínas y aminoácidos más complejos que son necesarios para la estimulación de crecimiento, ayuda al coral a poder fijar con mayor facilidad carbonatos de calcio y cobertura en tejido apto para corales suaves, octocorales y anemonas coloniales.

Microvert: es una dieta alimenticia equilibrada para corales, esponjas, anemonas, gorgonáceos, poliquetos plumeros y otros organismos filtradores, rico en vitaminas y minerales a base de espirulina.

Iodine: está presente naturalmente en el agua de mar sin embargo en sistemas de cultivo y acuarios se agota rápidamente, Iodine kent marine funciona como antioxidante que ayuda a mantener las bacterias beneficiosas y buena calidad de agua así mismo mantiene a las bacterias maliciosas sin acción dentro del tanque.

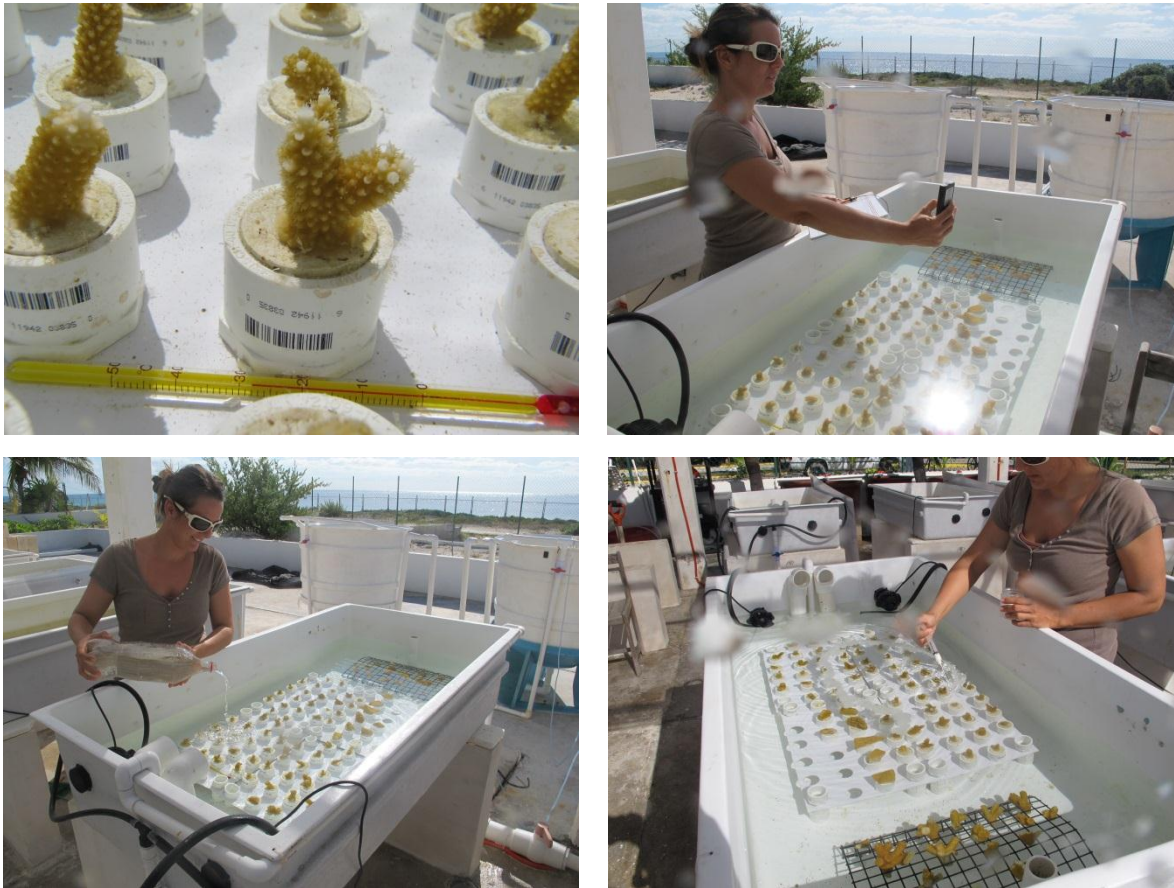


FIGURA 81. Registro de parámetros temperatura (arriba izq) y luz (arriba der); y suministro de alimento vivo (abajo izq) y suplementos artificiales (abajo der).

c) Seguimiento de luz y temperatura en los diferentes módulos del vivero

Se presenta un análisis del registro de la temperatura del agua y cantidad de luz que se ha llevado a cabo en el Sistema de Cultivo Externo (SCE), bajo la perspectiva de 2 hipótesis:

- Hipótesis 1: Existe diferencia significativa en temperatura e intensidad luminosa en los sistemas #2 y #8.

El sistema #2, con sol directo, muestra temperatura e intensidad luminosa promedio mayor que el sistema #8, sin embargo, los valores promedio no salen del rango de desviación estándar (Figura 82). En temperatura respecto a los máximos y mínimos en el #2 se mantiene 1°C mayor que el #8; el valor máximo en el #2 fue 33.74°C mientras que en #8 fue 32.18°C; el valor mínimo sigue el mismo patrón, en el #2 fue 26.48°C y en #8 fue 25.61°C. Respecto a intensidad luminosa el máximo en el #2 registró 187379 lux alcanzando 17.6% más que #8 con 154312 lux, los valores mínimos fueron 10.8 lux en ambos sistemas (dicha lectura corresponde a la intensidad luminosa de las lámparas fluorescentes al momento de finalizar el tratamiento alimenticio nocturno).

La prueba T student de dos colas muestra que la diferencia entre los sistemas no es significativa tanto en la temperatura ($t_{cal}=1.6 \text{ E-}48 < t_{crit}=1.96$) como en intensidad luminosa ($t_{cal}=1.4 \text{ E-}102 < t_{crit}=1.96$).

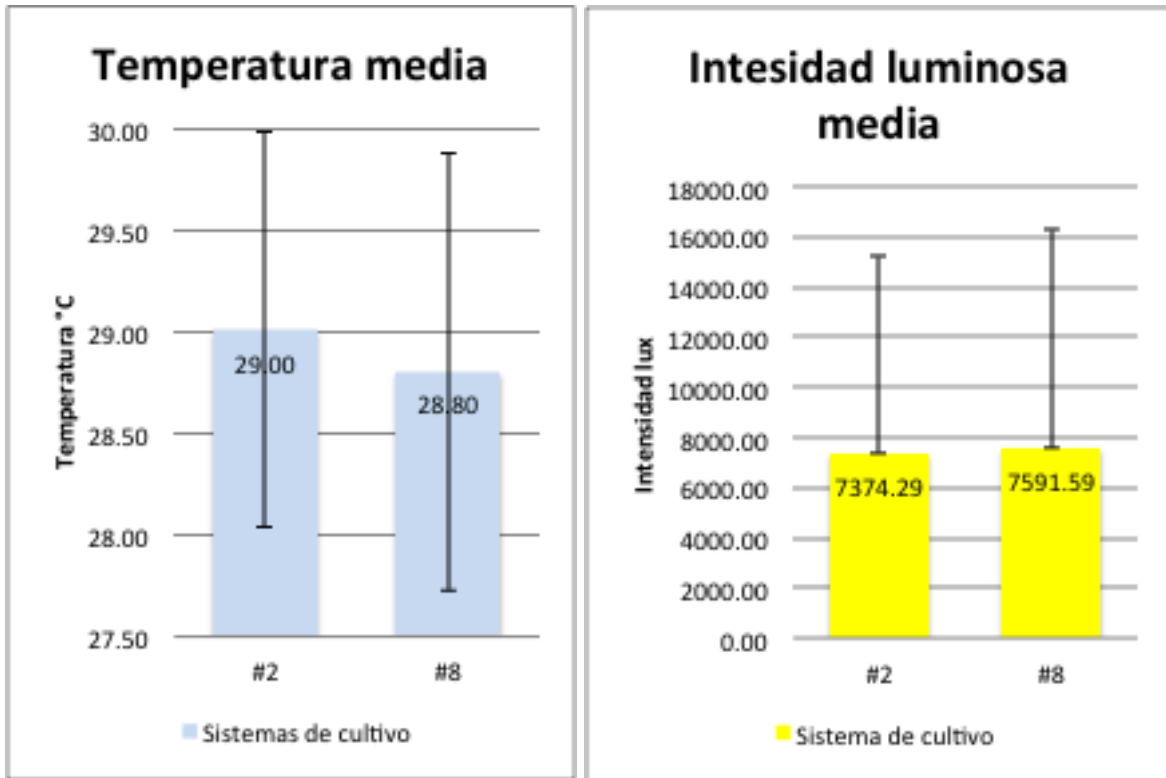


FIGURA 82. Temperatura media (izquierda) e intensidad luminosa media (derecha) durante 37 días con registro cada 5 minutos en los sistemas de cultivo exterior #2 y #8.

- Hipótesis 2: Al finalizar el tratamiento alimenticio la temperatura es diferente al grupo control.

Alimentación diurna (8-12hrs): al inicio del experimento (Noviembre) la temperatura es similar respecto al grupo control, sin embargo, hacia el final del experimento (Marzo-Abril) se observa cómo se incrementa la temperatura en el sistema con tratamiento (Figura 83a). La temperatura promedio en el sistema con tratamiento fue 28.79°C (±1.7) ligeramente mayor que en grupo control con 28.3 °C (±1.22). Los valores máximos respectivamente son 32.35 °C y 31.37 °C mientras que los mínimos son 24.36 °C y 25.02 °C. La prueba T student de dos colas muestra que la diferencia de temperatura entre los sistemas no es significativa ($t_{cal}=5.64 \text{ E-}05 < t_{crit}=1.96$).

Alimentación nocturna (20-24hrs): durante la mayor parte del experimento la temperatura es menor respecto al grupo control, sin embargo, ambas muestran una tendencia a la baja (Figura 83b). La temperatura promedio en el sistema con tratamiento fue 26.43°C (±1.49) ligeramente menor que en grupo control con 26.96 °C (±1.28). Los valores máximos respectivamente son 29.46 °C y 29.52 °C mientras que los mínimos son 20.98 °C y 23.19 °C. La prueba T student de dos colas muestra que la diferencia de temperatura entre los sistemas no es significativa ($t_{cal}=2.25 \text{ E-}10 < t_{crit}=1.98$).

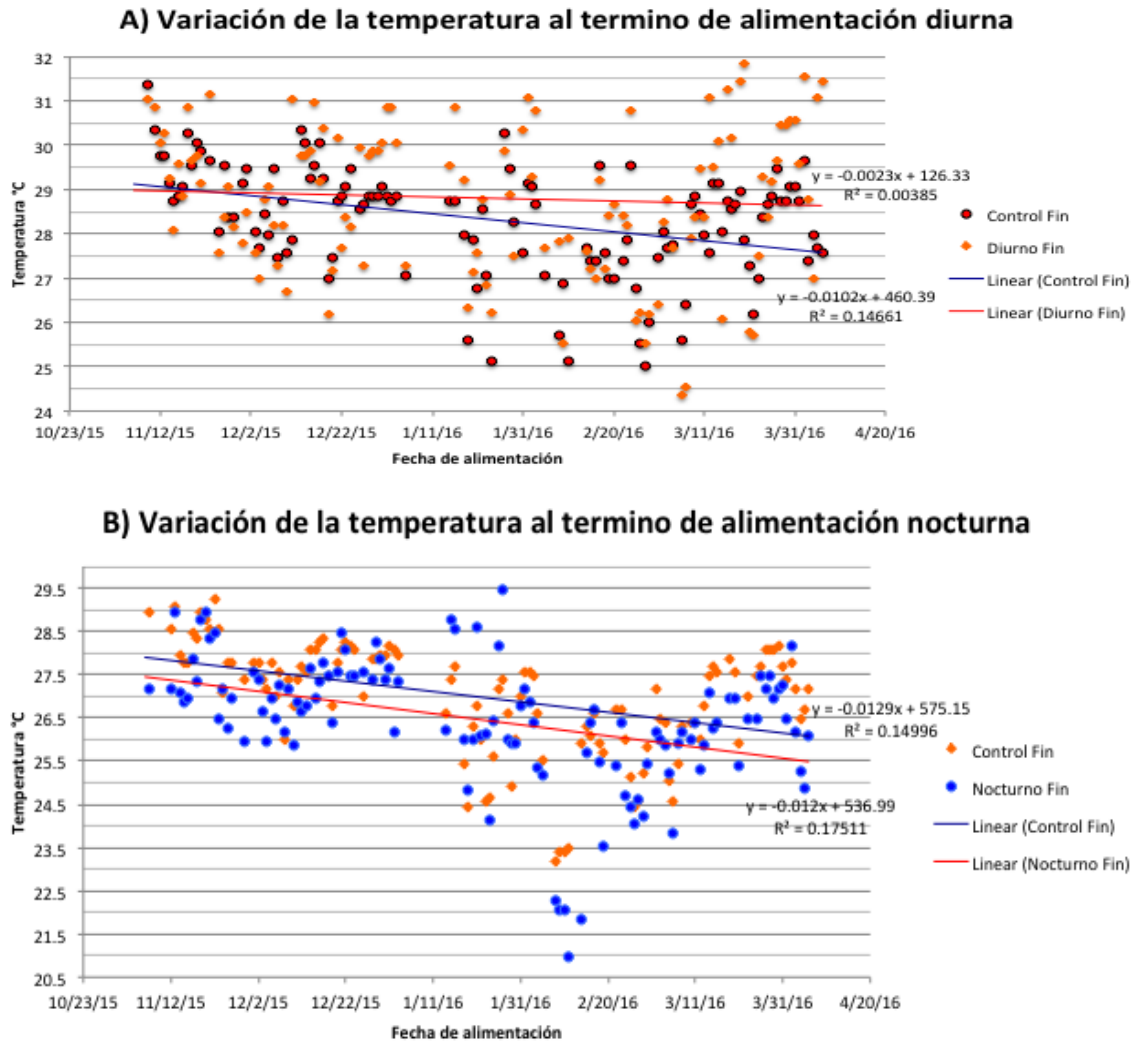


FIGURA 83. Registro diario de la temperatura al finalizar el tratamiento alimenticio respecto el grupo control; A) Horario diurno 8-12hrs y B) Horario nocturno 20-24hrs.

c) Variación climática en SCE y control de filtros

Los filtros de 50 y 20 micras de luz de malla se disponían en condiciones normales y hasta 2 o 3 días después de un evento climático, cuando el viento recuperaba su dirección. En el primer día de llegada de un evento, cuando la Beufort era 0, se disponían los filtros de 20 y 5 micras debido a que un cambio en la dirección del viento provoca resuspensión del sedimento en las aguas someras de la toma de agua marina.

4.3.4. Colecta de fragmentos de coral

Durante el proyecto se llevaron a cabo 8 colectas de fragmentos de coral para abastecer los Sistemas de Cultivo Externo (SCE), con lo que se logró un avance del 100 % del proyecto.

Las fechas y lugares de las colectas, así como el número de colonias colectadas por especie se presentan en la Tabla 16.

TABLA 16. Resumen de los eventos de colecta de corales para producir colonias de abasto a los SCE.

Etapa	Sitio de colecta	Fecha	Género	Especie	No. colonias
1a	Vivero Marino Bajo Pepito (SCM)	12 marzo 2013	<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	40
2a	Punta Nizuc	26 septiembre 2013	<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	3
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	1
			<i>Montastraea</i>	<i>cavernosa</i>	2
			<i>Orbicella</i>	<i>faveolata</i>	5
			<i>Porites</i>	<i>porites</i>	5
3a	La Cadenita Isla Mujeres	28 febrero y 07 marzo 2014	<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	12
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	4
4a	La Cadenita Isla Mujeres	07 octubre 2014	<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	2
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	3
			<i>Orbicella</i>	<i>annularis</i>	2
5a	Tercera Barrera de Punta Nizuc	27 de enero 2015	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	4
		11 de febrero 2015	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	3
6a	Vivero Marino Bajo Pepito (SCM)	8 octubre 2015	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	4
			<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	16
7a	3ª Barrera de Nizuc	4 febrero 2016	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	6
			<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	8
	Vivero Marino Bajo Pepito (SCM)	4 de febrero 2016	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	41
			<i>Orbicella</i>	<i>annularis</i>	1
			<i>Montastraea</i>	<i>cavernosa</i>	1
			<i>Acropora</i>	<i>cervicornis</i>	11
7a	Vivero Marino Bajo Pepito (SCM)	7-8 de abril de 2016	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	51
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	51
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	51
			<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	51
8a	Arrecife Tanchacté	26 septiembre 2016	<i>Acropora</i>	<i>palmata</i>	5
			<i>Orbicella</i>	<i>faveolata</i>	2
			<i>Orbicella</i>	<i>annularis</i>	1
			<i>Pseudodiploria</i>	<i>strigosa</i>	1

4.3.5. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero

Durante el proyecto se llevaron a cabo 8 eventos de producción de colonias de coral para abastecer los Sistemas de Cultivo Externo (SCE), con lo que se cubrió un avance del 100%.

En la Tabla 17 se presenta el número de colonias producidas por especie en cada lote. También se indica la clave de identificación que se utilizó para cada fragmento, de acuerdo al número de lote (A-G), lugar (BP=Bajo Pepito; NZ= Nizuc; CD=Cadenita; TB=Tercera Barrera), la especie en número romano, y el número de fragmento en número arábigo.

TABLA 17. Producción de colonias por propagación para el SCE.

Etapa	Claves de identificación	Especie	Número de fragmentos	Tipo de colonia
1a	A-BPI(1-800)	<i>Acropora cervicornis</i>	800	Fragmento
2a	B NZ I (1-31)	<i>Acropora cervicornis</i>	31	Fragmento
	B NZ II (1-21)	<i>Acropora palmata</i>	21	
	B NZ III (1-4)	<i>Montastraea cavernosa</i>	4	Fragmento en roca
	B NZ IV (1-12)	<i>Orbicella faveolata</i>	12	Frag. en roca
	B NZ V (1-27)	<i>Porites porites</i>	27	Fragmento
	B NZ VI (1-68)	<i>Undaria tenuifolia</i>	68	
3a	C CDI(1-493)	<i>Acropora cervicornis</i>	493	Fragmento
	C CDI(1-73)	<i>Acropora palmata</i>	73	
4a	D CDI (1-85)	<i>Acropora cervicornis</i>	85	Fragmento
	D-CDII (1-80)	<i>Acropora palmata</i>	80	
	D-CDII (1-44)	<i>Orbicella annularis</i>	44	
5a	E TBI (1-144)	<i>Acropora palmata</i>	144	Fragmento
6a	F-BPI (1-402)	<i>Acropora cervicornis</i>	402	Fragmento
	F-BPII (1-20)	<i>Acropora palmata</i>	20	
	s/m	<i>Acropora cervicornis</i>	154	Clones para Re-skinning
		<i>Acropora palmata</i>	70	
7a	G-NZI (1-19)	<i>Acropora cervicornis</i>	19	Fragmento
	G-NZII (1-86)	<i>Acropora palmata</i>	86	
	s/m	<i>Acropora palmata</i>	102	Clones para Re-skinning
		<i>Monastrea cavernosa</i>	26	
		<i>Orbicella annularis</i>	20	
8a	s/m	<i>Acropora palmata</i>	94	Clones para Re-skinning
		<i>Orbicella faveolata</i>	26	
		<i>Orbicella annularis</i>	17	
		<i>Pseudodiploria strigosa</i>	12	

4.3.6. Exportación de fragmentos de coral

Durante el proyecto se llevaron a cabo 8 eventos de exportación de fragmentos del SCE hacia el SMC. Para esta actividad se logró un avance del 100%.

El 30 de enero del 2016 se realizó un evento de transferencia de 209 fragmentos de que se mantenían en los Sistemas de Cultivo Externo (SCE) al módulo del vivero que se encuentra en el mar en Bajo Pepito (SCM). Estas colonias son una fracción del lote que se encontraban bajo experimento de alimentación diurna vs. Nocturna. Teniendo que 80 colonias que se habían alimentado de día se colocaron en las placas 42, 67, 68 y s/m azul junto a 42; mientras que 117 colonias que se habían alimentado de noche se colocaron en las placas 34, 69, 72 y s/m vieja; además de 12 colonias del grupo control que no se habían alimentado se colocaron en las placas de día y noche con espacio (Tabla 18).

TABLA 18. Registro de los eventos de exportación de colonias producidas en el SCE hacia el SCM/área restauración.

Etapa	Fecha	Especie	Módulo del vivero	No. fragmentos
1a	Nov 2012	<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	107
2a	6 sep 2013	<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	85
3a	Dic 2013	<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	145
		<i>Acropora palmata</i>	SCM	20
		<i>Porites porites</i>	SCM	19
		<i>Undaria tenuifolia</i>	SCM	68
		<i>Montastraea cavernosa</i>	SCM	4
		<i>Orbicella faveolata</i>	SCM	12
4a	07 ago 2014	<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	461
		<i>Acropora palmata</i>	SCM	71
5a	18 mar 2015	<i>Orbicella annularis</i>	Arrecife Cuevones	22
	19 mar 2015	<i>Orbicella annularis</i>	Arrecife Manchones	22
6a	18 abr 2015	<i>Acropora palmata</i>	Arrecife Manchones	24
7a	30 ene 2016	<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	190
		<i>Acropora palmata</i>	SCM	19
8a	8 junio 2016	<i>Acropora palmata</i>	SCM	188
		<i>Acropora cervicornis</i>	SCM	139
		<i>Montastraea cavernosa</i>	SCM	26
		<i>Orbicella annularis</i>	SCM	20

4.3.7. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo (Acuario)

Durante el proyecto se realizaron 16 registros biométricos (Monitoreos 1-16) para estimar la sobrevivencia y crecimiento de los corales en cultivo que se produjeron en cada una de las etapas. Esta actividad se cubrió al 100% para todo el proyecto.

a) Sobrevivencia de los lotes de producción

En la Tabla 19 se presenta un resumen de los porcentajes de sobrevivencia registrados en los lotes de producción de colonias en los sistemas de Acuario. Se observa que la sobrevivencia de los fragmentos en un lapso de 6 meses estuvo entre el 70 y el 97%, a excepción de la segunda etapa en donde se registró una mortalidad masiva debido al incremento de la temperatura de los sistemas por la entrada de agua de la laguna a más de 30°C

TABLA 19. Registro de sobrevivencia en los lotes de producción por periodo de 6 meses.

Etapa	Especie	Total de colonias	Sobrevivencia (%)
1a	<i>A. cervicornis</i>	208	78.4
2a	<i>A. cervicornis</i>	800	36.3
3a	<i>A. cervicornis</i>	117	72.6
4a	<i>A. cervicornis</i>	477	96.9
	<i>A. palmata</i>	71	93.0
5a	<i>A. palmata</i>	299	77.3
6a	<i>A. cervicornis</i>	423	74.0
7a	<i>A. cervicornis</i>	360	97.5
8a	<i>A. cervicornis</i>	120	97.5

b) Crecimiento de las colonias en los lotes de producción

En la Tabla 20 se presenta un resumen de los crecimientos registrados en los lotes de producción de colonias en los sistemas de Acuario. Se observa que el crecimiento registrado por semestre fue muy variable, presentando en general valores muy bajos, del orden de 0.3 a 3.49 cm de longitud y entre 1.7 y 5.9 gramos para *Acropora cervicornis*; y de 1.03 cm y 10.56 gr para *Acropora palmata*. Estos valores tan bajos se deben a que después de que se fragmentan las colonias, los 3 primeros meses se genera tejido para recubrir las heridas que se generaron por el corte, y hasta que se termina este proceso empieza un crecimiento apical en las colonias.

TABLA 20. Registro de crecimiento en los lotes de producción por periodo de 6 meses.

Etapa	Especie	Altura (cm)	Peso (gr)
1a	<i>A. cervicornis</i>	0.29±1.08	2.75±4.93
2a	<i>A. cervicornis</i>	3.49±1.26	5.95±8.83
3a	<i>A. cervicornis</i>	0.15±1.50	1.7±10.5
4a	<i>A. cervicornis</i>	1.99±1.29	5.82±6.54
	<i>A. palmata</i>	1.03±1.58	10.56±24.37
5a	<i>A. palmata</i>	0.4±1.30	2.08±2.6
7a	<i>A. palmata</i>	1.38±1.41	3.63±5.8
8a	<i>A. cervicornis</i>	1.38±1.41	3.63±5.8

4.4. Sistemas marinos

4.4.1. Instalación de sistemas de cultivo en el mar con capacidad para 1200 fragmentos

La instalación de los sistemas de cultivo en el vivero marino se concluyó en la 3ª etapa del proyecto, con lo que se cumplió con el 100% del avance del proyecto.

El vivero de coral marino tiene una capacidad para 1500 colonias de coral. En las imágenes se observa el vivero a los 2 meses de haber sido instalado en comparación con el mismo sitio en las últimas etapas del proyecto (Figura 84).

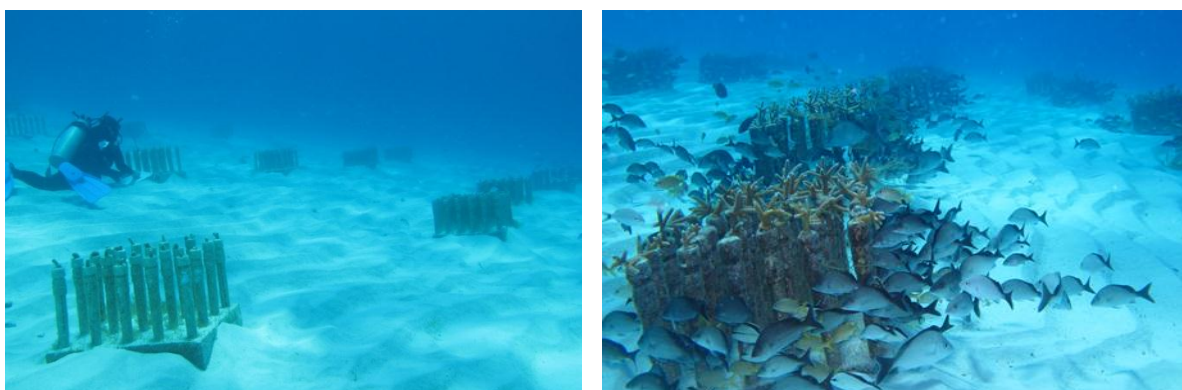


FIGURA 84. Sistema de Cultivo Marino (SCM) a los pocos meses de haber sido instalado (izq.) y durante las últimas etapas del proyecto.

4.4.2. Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero

La producción de lotes de colonias para abastecer el vivero se llevó a cabo de manera semestral, realizando 8 eventos de fragmentación logrando un avance del 100%.

Se logró una producción de un total de 3674 colonias de 7 especies de coral en 8 eventos de fragmentación, de acuerdo a lo presentado en la Tabla 21.

TABLA 21. Número de colonias producidas por especie en el Sistema de Cultivo Marino (SCM) en Bajo Pepito, durante el proyecto

Etapa	<i>A. cer</i>	<i>A. pal</i>	<i>U. aga</i>	<i>O. annu</i>	<i>M. cav</i>	<i>P. por</i>	<i>D. cyl</i>	Total
1a	228	3	164	39	82	228		744
2a	600							600
3a	87	477						564
4a	340							340
5a	122	192						314
6a	200	300					112	612
7a	200	300						500
8a		700						700

4.4.3. Exportación de fragmentos de coral (de SCM a sitios de restauración)

Se realizaron 5 eventos de exportación de fragmentos del SCM hacia los sitios de restauración; además de un evento de exportación desde el vivero marino de la CONANP hacia los sitios de restauración al inicio del proyecto, con lo que se logró un avance del 100%.

La Tabla 22 presenta un resumen del número de colonias exportadas por especie desde los viveros marinos hacia las áreas de restauración.

TABLA 22. Número de colonias exportadas por especie del Sistema de Cultivo Marino (SCM) en Bajo Pepito de la etapa 3 a 7, y del vivero marino de la CONANP en la 2ª etapa del proyecto

ETAPA	ESPECIE	No. colonias	Sitio de restauración	Vivero de procedencia
2a	<i>Acropora cervicornis</i>	300	Manchones	PNCOIMPCPN, CONANP
		300	Cuevones	
3a	<i>Acropora cervicornis</i>	180	Manchones	SCM Bajo Pepito, Isla Mujeres
		180	Cuevones	
4a	<i>Orbicella annularis</i>	24	Cuevones	
	<i>Montastraea cavernosa</i>	77	Cuevones	
	<i>Undaria agaricites</i>	133	Manchones	
	<i>Porites porites</i>	180	Manchones	
5a	<i>Acropora cervicornis</i>	85	Cuevones	
		67	Manchones	
	<i>Acropora palmata</i>	65	Cuevones	
		118	Manchones	
6a	<i>Acropora cervicornis</i>	22	Cuevones	
		22	Manchones	
	<i>Acropora palmata</i>	90	Cuevones	
		90	Manchones	
7a	<i>Acropora cervicornis</i>	90	Cuevones	
		90	Manchones	
	<i>Acropora palmata</i>	72	Cuevones	
		70	Manchones	
	<i>Orbicella annularis</i>	31	Cuevones	
		34	Manchones	
<i>Montastraea cavernosa</i>	37	Cuevones		
	56	Manchones		
		48	Cuevones	
		26	Manchones	

4.4.4. MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en SCM

Se llevaron a cabo 16 registros biométricos para estimar la sobrevivencia y crecimiento de los corales en cultivo en el SCM, con lo que se logró un avance del 100%. Se muestra la cronología de los registros biométricos del Monitoreo realizado en el proyecto (Tabla 23).

TABLA 23. Cronología de los registros biométricos para el Monitoreo del vivero marino (SCM).

Etapa	Monitoreo SCM	Fecha
1a	1-2	Abr 2013
2a	3-4	Jul 2013
3 ^a	5	6 nov 2013
	6	11-12 mar 2014
4 ^a	7	11 jun 2014
	8	19 sep 2014
5 ^a	9	22 ene 2015
	10	10 abr 2015
6 ^a	11	07-08 jul 2015
	12	23-24 sep 2015
7 ^a	13	14 abr 2016
	14	14 abr 2016
8a	15-16	13 jul 2016

Se muestra la comparación de la altura promedio por especie en los distintos registros del programa de monitoreo del vivero marino (SCM) (Figura 85 y Tabla 24).

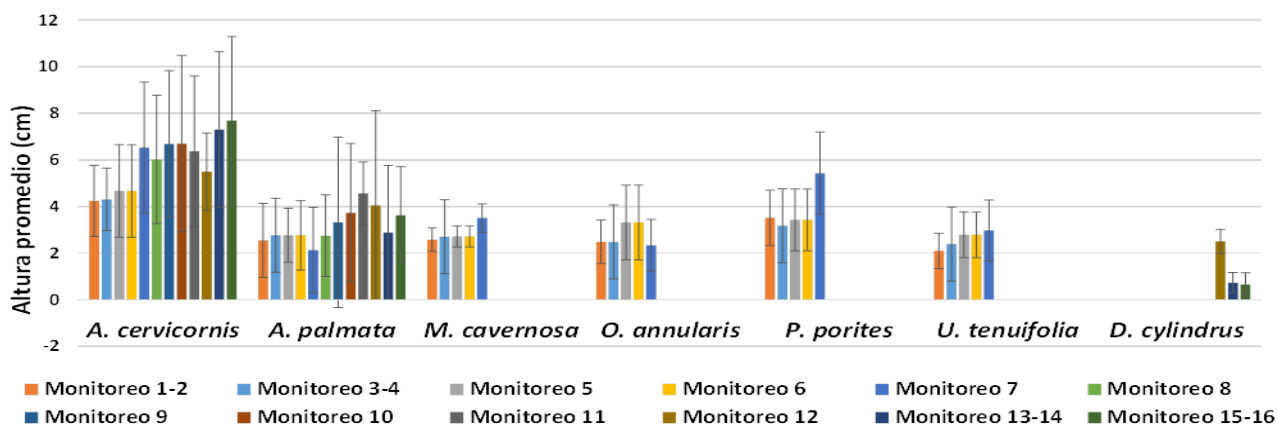


FIGURA 85. Representación gráfica de la altura promedio por especie entre los diferentes registros del programa de monitoreo realizados en el SCM.

TABLA 24. Valores de la altura promedio por especie entre los diferentes registros del programa de monitoreo realizados en el SCM.

Sp.	1-2	3-4	5	6	7	8	9	10	11	12	13-14	15-16
<i>Ac</i>	4.2±1.5	4.3±1.3	4.7±2.0	4.7±2.0	6.5±2.8	6.0±2.7	6.7±3.1	6.7±3.8	6.3±3.2	5.4±1.7	7.3±3.3	7.7±3.6
<i>Ap</i>	2.5±1.6	2.7±1.6	2.7±1.6	2.7±1.6	2.1±1.1	2.7±1.5	3.3±1.8	3.7±1.7	4.6±3.7	4.0±2.9	2.9±1.3	3.6±2.1
<i>Mc</i>	2.6±0.5	2.7±0.2	2.7±0.4	2.7±0.4	3.5±0.6							
<i>Oa</i>	2.5±0.9	2.5±1.1	3.3±1.6	3.3±1.6	2.3±1.1							
<i>Pp</i>	3.5±1.2	3.2±0.6	3.4±1.3	3.4±1.3	5.4±1.7							
<i>Ut</i>	2.1±0.8	2.4±0.4	2.8±1.0	2.8±1.0	3.0±1.3							
<i>Dc</i>										2.5±0.5	0.7±0.4	0.7±0.5

4.5. Sucesión

4.5.1. Introducción

A escala global los arrecifes de coral se han visto afectados de manera grave por diversos disturbios que han modificado los procesos que permiten su continuidad. Entre los disturbios que inciden en estos sistemas, los que afectan de manera directa su estructura física se encuentran dentro de los que mayor daño causan. De la variedad de estrategias usadas con mayor frecuencia para remediar los efectos nocivos sobre los arrecifes, destacan el establecimiento de áreas naturales protegidas y la restauración activa. Ambas estrategias buscan favorecer que los procesos naturales de las comunidades arrecifales actúen para incentivar una recuperación natural de la comunidad afectada, en el caso de las ANP, o para facilitar los procesos clave que aceleren la recuperación, en el caso de la restauración activa. Sin embargo, en México, la aplicación de estas estrategias ha carecido de un programa de investigación y monitoreo que observe y mida el efecto deseado. Esto, en parte, se debe al limitado entendimiento de los procesos sucesionales que ocurren en las comunidades afectadas por disturbios, que permite identificar el estado de las variables clave en la trayectoria de reorganización comunitaria. En este proyecto, se estudiaron los patrones espaciales y temporales de los tres componentes estructuradores clave de las comunidades arrecifales. De la comunidad de corales se analizaron las diferencias y similitudes de la estructura de la comunidad de corales, bajo condiciones de disturbio diferentes, en un periodo de 2 años. Se identificaron las especies dominantes de corales pétreos de manera regular y se registró la contribución de éstos a la comunidad de reclutas, así como las tasas de supervivencia de cada uno. El erizo *Diadema antillarum*, por su potencial capacidad de remoción de cobertura algal, fue seleccionado para establecer una relación entre su densidad y la cobertura de algas, principalmente algas carnosas, y se estableció su relación con la densidad de reclutas. De los grupos algales, se identificaron los cambios en cobertura como función del tiempo, así como del factor encallamiento y restauración activa.

4.5.2. Métodos

a) Evaluación del proceso sucesional

Escala de parche

A primera vista el parche arrecifal Cuevones aparenta un cambio en el tipo de coral dominante. En la porción de barlovento se aprecia una aparente dominancia de especies de corales pétreos, mientras que en sotavento las especies de coral blando son las que aparentan dominancia. La sección dominada por corales pétreos, a su vez, muestra cambios en su estructura física. En la porción Sureste se aprecia una mayor complejidad física y disminuye hacia el Noroeste. En la porción de sotavento la estructura física no aparenta un cambio importante y sólo fueron distinguibles las porciones dominadas por corales blandos y la zona de impacto (Figura 86).

Usando esta aparente variación en el tipo de coral dominante y en la estructura física, el parche fue dividido en cuatro sectores: el sector afectado por el encallamiento (Imp) y tres sectores de referencia (R1-R3) (Figura 86). El sector de impacto se encuentra del lado de sotavento del parche, desde el borde sur-este hasta aprox. la mitad del parche. El sector con una aparente mayor complejidad física (R1) se encuentra en el lado de barlovento y contiguo al sector de impacto. El tercer sector (R2), en sotavento, es el que aparenta una menor complejidad física como consecuencia de las estructuras de fijación de los corales

blandos. Finalmente, el cuarto sector (R3) que aparenta estar dominado por especies de corales pétreos con menor complejidad física que en R1, se encuentra del lado de barlovento (Figura 86).

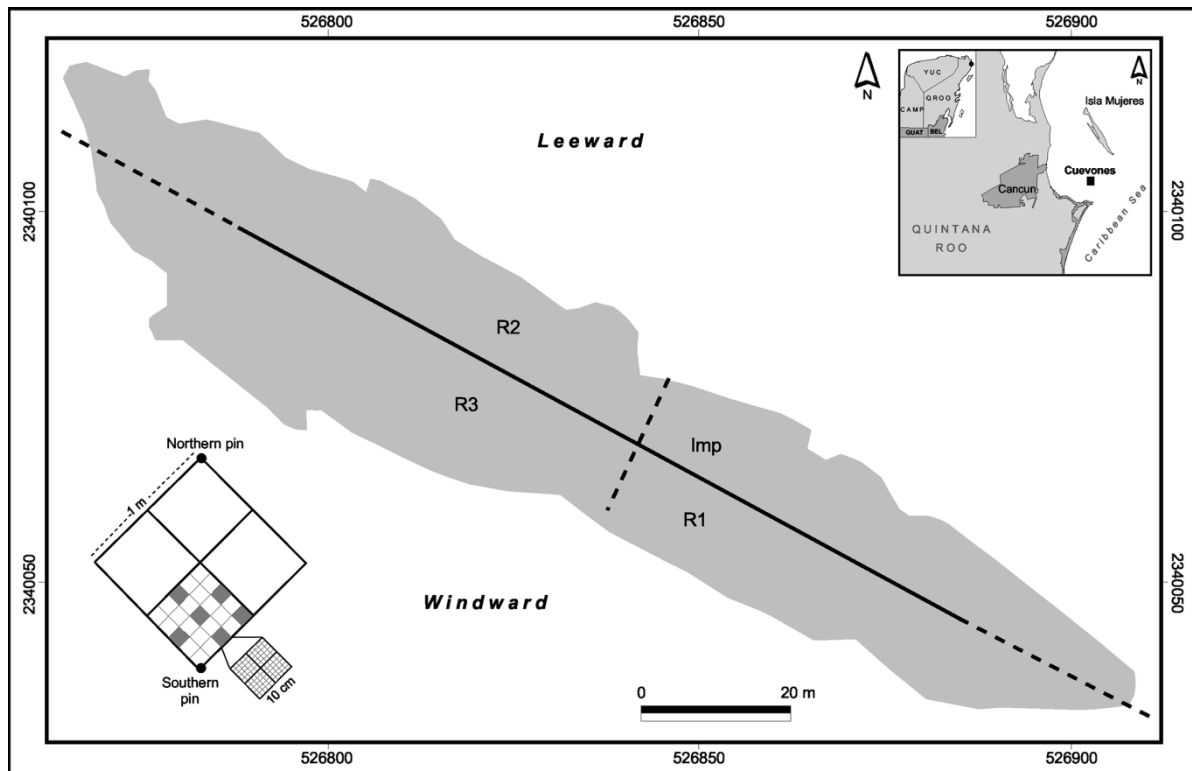


FIGURA 86. Diagrama del parche arrecifal Cuevaones dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. El parche fue dividido en cuatro sectores: Impactado (Imp) y tres sectores de referencia (R1-R3). Coordenadas UTM Zona 16N. La figura inserta detalla las unidades de muestreo fijadas de manera permanente.

Considerando la división propuesta, en cada sector se determinó la complejidad física arrecifal y la estructura de la comunidad bentónica. Para determinar la estructura física se usaron de 4 a 5 transectos de 10m de longitud en cada sector y con una separación entre sí de 10 m. Los transectos se colocaron desde el centro del arrecife hacia sus márgenes en barlovento o sotavento según el sector. Cada uno de los transectos se usó como referencia para colocar sobre la superficie arrecifal una cadena de PVC lastrada de manera que fuera posible imitar los cambios físicos del sustrato. La manipulación de la cadena y transecto se hizo evitando causar daños a las colonias. Al finalizar el recorrido de cada transecto se determinó la extensión total de cadena usada. El índice de rugosidad fue calculado como la proporción de entre la longitud total de la cadena y la longitud del transecto. De este modo para las superficies completamente planas el índice es igual a uno.

Con los mismos transectos usados en la determinación de la complejidad arrecifal, la estructura de la comunidad de corales fue estimada en términos de la composición específica y la abundancia de colonias. Todas las colonias que interceptaban el transecto fueron consideradas parte del estudio. En el caso de las colonias de corales pétreos fueron medidos la cobertura lineal bajo el transecto, el diámetro mayor y el diámetro perpendicular. Adicionalmente, para cada colonia fue estimado el porcentaje de

mortalidad o de cobertura por epibiontes. En el caso de las colonias de coral blando se registró su altura.

Además de las colonias adultas, se midió la cobertura de algas y la abundancia de reclutas de coral usando entre 19 y 25 cuadros de PVC de 25 × 25 cm. Los cuadros fueron colocados cada 2 metros a lo largo de los transectos de 10 m. Dentro de cada cuadro el porcentaje de cobertura algal fue estimado visualmente. La cobertura de algas se dividió en 5 tipos, 1) macroalgas carnosas (MAC), algas verdes o cafés con tallos erectos, 2) algas calcáreas ramificadas (ACR), algas con tallos erectos y calcificados, 3) Algas filamentosas de tapete (AFT), algas filamentosas aisladas o formando tapetes, 4) algas incrustantes coralinas (ACC), algas calcificadas con crecimiento horizontal, y 5) algas incrustantes no coralinas (CNC), algas no calcificadas con crecimiento horizontal. Un recluta de coral pétreo fue definido como aquella colonia de coral cuyo diámetro fuera ≤ 4 cm y un recluta de coral blando fue definido como aquella colonia con altura ≤ 10 cm. La densidad del erizo *Diadema antillarum* a esta escala fue estimada usando transectos de banda de 10 × 1 m centrados a lo largo de los transectos lineales previamente descritos.

Análisis de los datos: escala de parche

Para comparar la estructura de la comunidad de corales entre sectores, usamos una aproximación multivariada basada en matrices cuadradas independientes de la abundancia de colonias, altura de la colonia, cobertura lineal y cobertura estimada de tejido vivo como variables de respuesta. Para el caso de la abundancia de colonias los datos fueron transformados con la raíz cuadrada, para la cobertura lineal y tejido vivo se hizo una transformación logarítmica. Posterior a la transformación se calcularon las matrices triangulares usando el índice de Bray-Curtis y las diferencias entre sectores fueron determinadas con un análisis independiente PERMANOVA para cada variable de respuesta usando PRIMER V6 (Clarke y Gorley, 2006). Para el caso de las especies con un número de colonias > 20 se construyó la distribución de tallas usando la regla de Sturges para definir el número de clases a utilizar. Un análisis de sesgo (Zar, 2009) fue usado para determinar si la distribución presentaba un sesgo a la derecha, lo cual implica una mayor frecuencia de individuos en las tallas pequeñas y denota un proceso de establecimiento y supervivencia exitoso de las especies de coral. Para determinar diferencias entre los sectores con base en la cobertura de los grupos algales, se hizo un PERMANOVA de una vía y para los erizos una ANOVA de una vía. Adicionalmente, se usó una correlación de Pearson para examinar la relación entre la densidad de erizos y la cobertura de algas carnosas.

b) Escala 1m²

Marcaje permanente de las áreas para evaluación sucesional

Para la evaluación de los procesos sucesionales se marcaron de manera permanente el área afectada por el encallamiento sin restauración y una zona no afectada por el encallamiento contigua a la de impacto. Se marcaron 80 cuadros de 1 m², 40 en la zona afectada y 40 en la no afectada por el encallamiento, utilizando varillas de acero inoxidable según lo sugerido por Jokiel *et al.* (2006). Para cada cuadro se utilizaron dos varillas en la diagonal N-S de cada cuadro (Figura 87).

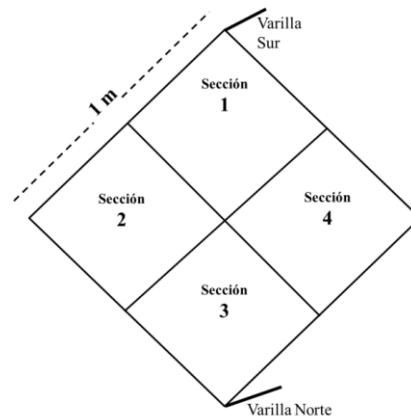


FIGURA 87. Diagrama de los cuadros de 1 m² y las secciones propuestas. La vista corresponde a la que tuvieron los colectores en el sitio dada la dirección de la corriente.

Para colocar las varillas se hicieron perforaciones de aprox. 30 cm de profundidad y 3/8" de diámetro usando un taladro neumático (Figura 88). Este procedimiento se hizo con extremo cuidado para evitar que las perforaciones fueran hechas sobre colonias vivas o que éstas fueran lesionadas como consecuencia de la manipulación del taladro. Debido a las condiciones de la corriente los cuadros se colocaron con una distribución sistemática en ambas secciones del arrecife.



Figura 88. Perforación de la matriz arrecifal para el marcaje de los cuadros permanentes.

Dentro de los cuadros se evaluó la estructura de la comunidad de corales adultos y la densidad de *D. Antillarum*. La comunidad de corales adultos fue evaluada en cinco ocasiones: febrero de 2013, agosto de 2013, febrero de 2014, septiembre de 2014 y octubre de 2015. Para la obtención de los datos de las colonias se usó un cuadro de 1m² de nylon para delimitar el área de medición. Las mediciones de las colonias que se obtuvieron fueron las mismas que se hicieron a la escala de parche. El área de las colonias de corales pétreos y los grupos epibiontes se calculó como una elipse usando el diámetro máximo y el diámetro perpendicular. Usando estas coberturas, se estimó el área de tejido vivo restando el área de los grupos epibiontes y mortalidad reciente al área total

de la colonia. La densidad de erizos de *D. antillarum* se registró de manera bimestral desde febrero de 2013 hasta diciembre de 2014, en abril y octubre de 2015; también se identificó el estadio de desarrollo que tenían (i.e. adultos o juveniles). Los juveniles de esta especie destacan por presentar un patrón anillado en las espinas (Hendler *et al.* 1995).

Análisis de los datos: escala 1m²

Para analizar la estructura de la comunidad del sector de impacto sin restauración activa y el de referencia se construyó una matriz de disimilitud basada en el índice Bray-Curtis con los datos de abundancia, cobertura estimada de tejido vivo para los corales pétreos y la altura de las colonias de coral blando con un análisis PERMANOVA independiente para cada variable de respuesta. En el caso de que el análisis PERMANOVA mostrara diferencias significativas se hicieron pruebas pareadas para determinar dónde están las diferencias. Estos análisis permiten particionar la variación de la matriz de disimilitud de acuerdo a un diseño multifactorial (condición y fecha). Todos los análisis se hicieron con el paquete PERMANOVA+ para PRIMER v6 (Anderson *et al.*, 2008).

Evaluación del efecto de la restauración activa en la comunidad bentónica.

Considerando las actividades de restauración y buscando adquirir la mayor cantidad de información posible, sin comprometer la integridad de los fragmentos introducidos, los muestreos se hicieron semestralmente (en abril y noviembre de 2014, y en abril y agosto de 2015). Para el muestreo, se fijaron de manera permanente ocho transectos de banda de 10 × 1 m en cada condición (referencia, impacto sin restauración e impacto con restauración), entre cada transecto se mantuvo una separación de al menos 5 m. En cada transecto se seleccionaron aleatoriamente 5 cuadros de 1 m², para un total de 40 cuadros por condición por fecha (Figura 89). En cada cuadro, todas las colonias de corales pétreos se identificaron al nivel de especie. Para los corales adultos (>4cm de diámetro) se midieron el diámetro máximo, perpendicular y la altura; se estimó el porcentaje y tipo de mortalidad: reciente (se aprecian la estructura calcárea de la colonia) y antigua (porciones de la colonia colonizada por otros grupos); y se registró la presencia de enfermedades bacterianas y blanqueamiento. Los reclutas se identificaron a nivel de género y sólo se midió el diámetro máximo. La abundancia del erizo *Diadema antillarum* también fue registrada dentro de cada cuadro.

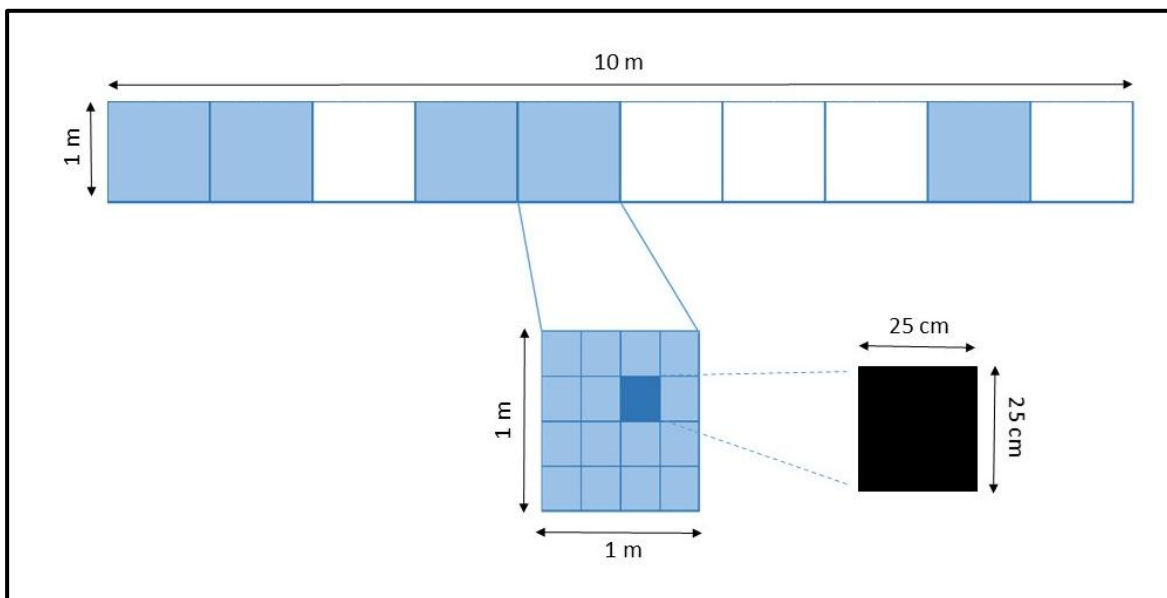


FIGURA 89. Representación de un transecto de banda y ejemplo de los 5 cuadros de 1m^2 (sombreado azul), y un cuadro de $25 \times 25\text{ cm}$ (sombreado negro) dentro del cuadro de 1m^2 .

Para medir la cobertura de algas, cada cuadro de 1m^2 fue dividido en 16 subunidades de $25 \times 25\text{ cm}$. Una de estas submuestras fue seleccionada aleatoriamente para determinar, de manera visual, la cobertura de los 5 grupos funcionales de algas descritos anteriormente.

Análisis de datos: efecto de la restauración activa en la comunidad bentónica.

Para cada condición se calcularon los promedios de la densidad de colonias, se estimó la cobertura de tejido vivo, el área afectada por mortalidad o enfermedad por colonia, la densidad de reclutas y de erizos. El promedio de la densidad y de tejido vivo fue calculado para las especies con mayor abundancia, así como para *Acropora cervicornis*. El área de las colonias fue calculada como una elipse usando los diámetros medidos. También fue calculada la densidad de los reclutas y erizos.

Con los datos obtenidos y transformados con la raíz cuadrada se construyó una matriz de disimilitud de Bray-Curtis. La estructura de la comunidad fue analizada usando análisis multivariados de varianza basados en permutaciones (PERMANOVA) usando los factores condición y fecha. En el caso de arrojar diferencias significativas, se hizo una prueba pareada. Todos los análisis se hicieron en PERMANOVA+ y PRIMER v6 (Clarke y Gorley, 2006; Anderson *et al.* 2008).

c) Escala de $10 \times 10\text{ cm}$

Para evaluar el proceso de reclutamiento entre la sección de impacto sin restauración activa y la de referencia, se usó un cuadro de PVC de $50 \times 50\text{ cm}$ atado a la varilla sur de cada cuadro de 1m^2 , y dividido en 25 unidades de $10 \times 10\text{ cm}$. (Figura 90). Dentro de cada unidad de $10 \times 10\text{ cm}$, y para los 40 cuadros de cada una de las secciones del arrecife, se buscaron y registraron todos los reclutas de corales pétreos y blandos. En el caso de corales pétreos, se definió como un recluta a aquella colonia con un diámetro máximo $\leq 4\text{ cm}$ y en el caso de los corales blandos aquella colonia $\leq 10\text{ cm}$ de altura. El registro de los reclutas se hizo bimestralmente desde octubre de 2012 hasta diciembre de

2014, y en abril, octubre y diciembre de 2015. Cada recluta fue identificada hasta el nivel de género.

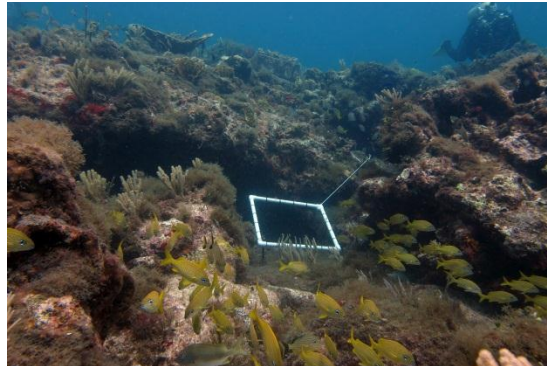


FIGURA 90. Disposición de un cuadro de 50 × 50 cm sobre el sustrato del parche arrecifal Cuevones.

Además de las reclutas, cada bimestre se registró la cobertura de los grupos bentónicos. En un principio se buscó contar con el registro de las 25 unidades de los 80 cuadros. Sin embargo, dadas las limitaciones impuestas por el tiempo de fondo disponible y los cambios en la rigurosidad ambiental, el número de unidades medidas se redujo hasta una selección aleatoria de 5 unidades para 20 cuadros por sección marcada del parche. La cobertura de cada grupo bentónico se hizo con la ayuda de una gradilla graduada al centímetro. Cada centímetro fue asignado al grupo cuya cobertura abarcara más del 50% del mismo. Los organismos que se registraron fueron aquellos que estuvieran establecidos sobre el sustrato de manera directa, i.e. no se midió la cobertura de los grupos establecidos sobre otros. El registro de la cobertura de los grupos bentónicos se hizo con la misma frecuencia que la búsqueda de reclutas.

d) Análisis de los datos: escala 10 × 10 cm

Cambios en la cobertura de algas y registro de reclutas

Derivado de la reducción gradual de los cuadros y unidades para muestrear, se obtuvo un muestreo desbalanceado entre las diferentes temporadas de muestreo. Para poder hacer comparaciones válidas entre las diferentes temporadas, se seleccionaron aleatoriamente el mismo número de cuadros (50 × 50 cm) y el mismo número de muestras (10 × 10 cm) dentro de cada cuadro. Con el diseño balanceado, se calculó el porcentaje de cobertura promedio de cada uno de los grupos funcionales de algas. Para determinar la existencia de algún patrón espacial o temporal en la cobertura de algas, se hizo un análisis exploratorio NMDS. Con el diseño balanceado de muestras también se calculó la densidad promedio de reclutas de los géneros de corales pétreos. Finalmente, con los registros bimestrales y el registro fotográfico se dio seguimiento de cada uno de los reclutas del periodo 2013-2014 y se calculó el porcentaje de supervivencia para cada género de corales pétreos.

Placas de reclutamiento natural

La colocación de las placas de carbonato para el reclutamiento se hizo en dos momentos, la primera del 30 de julio al 1 de agosto de agosto de 2012 y la segunda en diciembre de 2013. Las placas se colocaron ca. 35 cm de la varilla norte. Cuando el sitio de colocación coincidió con una colonia de coral o con sustrato no consolidado se escogió otro punto. Para fijar las placas se hizo un agujero de 3/8' de diámetro y 5 cm de profundidad y se

sujetaron con la ayuda de taquetes y tornillos de acero. En cada sección, referencia e impacto sin restauración, se colocaron 40 placas de reclutamiento.

Las placas de la primera ocasión se retiraron en junio de 2013, se transportaron al laboratorio y se blanquearon con una solución de cloro al 25%. El blanqueamiento se hizo sin desprender ninguno de los organismos que colonizaron la placa. Después del blanqueamiento y secado de las placas se examinaron las superficies superior y exterior bajo un microscopio estereoscópico con un aumento de 35x. La búsqueda de reclutas se hizo siguiendo un patrón zigzag para revisar cuidadosamente toda la superficie. Cada uno de los esqueletos de reclutas fue marcado para ser fotografiado, medido e identificado hasta el nivel de género.

Para el segundo periodo se aprovechó la facilidad que las placas de reclutamiento ofrecen para 1) determinar el efecto de la disponibilidad de sustrato en los patrones de reclutamiento y en tiempos diferentes y 2) entender la dinámica del proceso sucesional de la comunidad de reclutas. Para determinar el efecto de la disponibilidad de sustrato generado en periodos de tiempo diferente, desde febrero de 2014, y con una periodicidad de dos meses, se retiraron y reemplazaron tres de las 40 placas de cada condición. Esto implica que cada juego de placas que es retirado permanece expuesto dos meses. Para su revisión las placas se blanquearon al 25% por tres días y enjuagadas con cuidado para evitar el desprendimiento de reclutas. Una vez secas, se examinaron bajo el microscopio estereoscópico del mismo modo que el primer juego de placas. Cada uno de los esqueletos de reclutas fue marcado para ser fotografiado, medido e identificado hasta el nivel de género.

e) Registro fotográfico

Para las secciones de impacto y no impacto se tomaron fotografías semestrales de cada una de las unidades de muestreo de los 40 cuadros por sección. El registro fotográfico se hizo en octubre de 2012, junio de 2013, abril y octubre de 2014 y agosto de 2015.

4.5.3. Resultados: Evaluación del proceso sucesional

a) Escala de parche

Complejidad física

El ANOVA reveló que existen diferencias estadísticas entre los sectores propuestos ($F = 6.15$, $P < 0.01$). La prueba post-hoc de Tukey mostró que la única diferencia detectable fue entre el sector R1 y R3 (Figura 91). La falta de diferencias estadísticas entre la sección de impacto y el resto es explicada por la cantidad de variación encontrada en el sector de impacto.

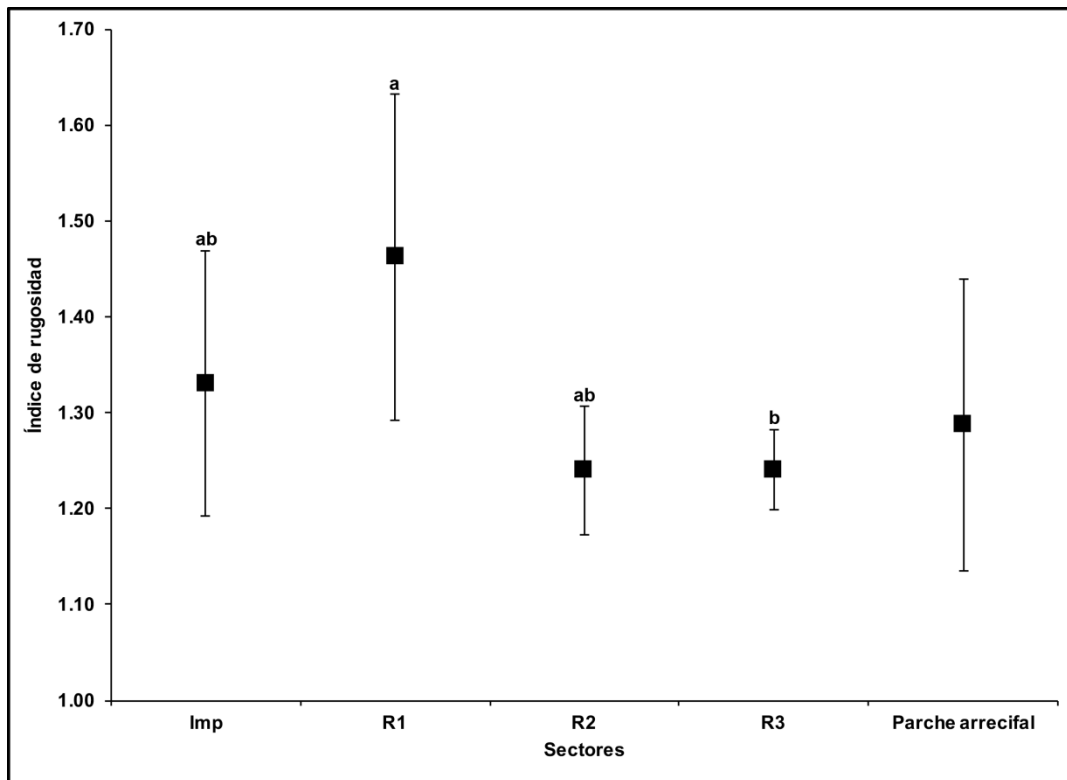


FIGURA 91. Índice de rugosidad promedio (± 1 E. E.) para los cuatro sectores propuestos y el parche. Las letras diferentes denotan diferencias significativas según la prueba Tukey. Las abreviaciones de los sectores son las mismas que en la figura E1.

Estructura de la comunidad coralina

A la escala de parche se registraron en total 26 especies, 12 de corales pétreos y 14 de corales blandos. El sector con el mayor número de especies fue R2 con 21 especies de corales pétreos y 13 de corales blandos, mientras que el sitio con menos especies fue el impactado con 13 especies (7 de corales pétreos y 6 de corales blandos) (Tablas 25 y 26). *Porites astreoides* fue la especie con mayor abundancia en todos los sectores y su cobertura lineal dominó en los sectores de impacto, R1 y R3. En términos de la cobertura estimada de tejido vivo, *P. astreoides* (0.128m²) dominó en el sector de impacto, *A. palmata* (0.264 m²) en R1, *Orbicella faveolata* (0.321 m²) in R2 y *Millepora complanata* en R3. De las especies clave en la construcción arrecifal *Acropora palmata* sólo estuvo presente en R1 mientras *Acropora cervicornis* estuvo sólo ausente en R2.

El análisis PERMANOVA no reveló ninguna diferencia significativa entre los cuatro sectores en el número de colonias, cobertura lineal de los corales pétreos (Tabla 27), cobertura estimada de tejido vivo y la altura de los corales blandos. En cuanto a la distribución de tallas de *Eunicea mammosa*, única especie de coral blando con suficientes colonias en los cuatro sectores para hacer un análisis, fue similar entre los sectores siendo la clase 15-25 cm de altura la que obtuvo mayor frecuencia. Sólo los sectores R1 y R3 tuvieron colonias en las clases de mayor talla (Figura 92).

TABLA 25. Abundancia relativa y absoluta, cobertura lineal promedio (cm), y cobertura estimada de tejido vivo (CETV)(m²) de las especies de corales pétreos en los cuatro sectores (impacto y tres de referencia) del parche arrecifal Cuevones. D.E. = error estándar, ¶ = especies registradas en todos los sectores. Negritas representan los valores máximos por sector.

Especies	Impacto n=4			R1 n=4			R2 n=5			R3 n=5		
	Abundancia absoluta relativa	Cobertura lineal promedio (1 E.E.)	CETV (1 E.E.)	Abundancia absoluta relativa	Cobertura lineal promedio (1 E.E.)	CETV (1 E.E.)	Abundancia absoluta relativa	Cobertura lineal promedio (1 E.E.)	CETV (1 E.E.)	Abundancia absoluta relativa	Cobertura lineal promedio (1 E.E.)	CETV (1 E.E.)
<i>Acropora cervicornis</i>	1 (2.78)	0.25 (0.250)	0.004 (0.0036)	4 (9.52)	3.25 (2.287)	0.018 (0.0107)				6 (16.22)	6.60 (3.059)	0.049 (0.0255)
<i>Acropora palmata</i>				2 (4.76)	27.50 (27.500)	0.264 (0.2643)						
<i>Agaricia agaricites</i>				3 (7.14)	1.75 (1.750)	0.002 (0.0025)						
<i>Pseudodiploria strigosa</i>				1 (2.38)	0.50 (0.500)	0.009 (0.0093)	1 (4.76)	2.00	0.015 (0.0152)			
<i>Millepora alaicornis</i> ¶	1 (2.78)	2.00 (2.000)	0.002 (0.0024)	1 (2.38)	0.25 (0.250)	0.001 (0.0009)	1 (4.76)	1.40 (1.400)	0.001 (0.0013)	5 (13.51)	3.60 (1.913)	0.006 (0.0022)
<i>Millepora complanata</i> ¶	4 (11.11)	4.25 (3.614)	0.014 (0.0082)	4 (9.52)	5.25 (1.250)	0.034 (0.0175)	3 (14.29)	5.00 (2.720)	0.006 (0.0027)	5 (13.51)	4.60 (2.561)	0.085 (0.0383)
<i>Montastraea cavernosa</i>										1 (2.70)	0.40 (0.400)	0.002 (0.0023)
<i>Orbicella faveolata</i>							1 (4.76)	31.40 (31.400)	0.321 (0.3214)	1 (2.70)	5.80 (5.800)	0.022 (0.0220)
<i>Porites astreoides</i> ¶	18 (50.00)	46.75 (6.421)	0.128 (0.0163)	23 (54.76)	44.00 (7.842)	0.143 (0.0332)	9 (42.86)	21.40 (10.284)	0.064 (0.0333)	17 (45.950)	28.80 (6.909)	0.082 (0.0815)
<i>Porites furcata</i> ¶	3 (8.33)	2.75 (1.702)	0.010 (0.0059)	3 (7.14)	2.75 (2.750)	0.004 (0.0039)	3 (14.29)	2.00 (0.949)	0.011 (0.0072)	1 (2.70)	0.40 (0.400)	0.001 (0.0013)
<i>Porites porites</i>	7 (19.44)	10 (4.453)	0.067 (0.0374)				2 (9.52)	2.60 (2.600)	0.010 (0.0105)			
<i>Siderastrea siderea</i> ¶	2 (5.56)	2 (1.225)	0.003 (0.0017)	1 (2.38)	0.75 (0.750)	0.012 (0.0118)	1 (4.76)	2.40 (2.400)	0.003 (0.0028)	1 (2.70)	0.60 (0.600)	0.001 (0.0006)
Colonias agrupadas	36 (100)	68.00 (12.682)	0.228 (0.0516)	42 (100)	86.00 (22.616)	0.488 (0.2230)	21 (100)	68.20 (40.322)	0.433 (0.3677)	37 (100)	50.80 (9.682)	0.248 (0.0400)

TABLA 26. Abundancias absolutas y relativas y talla promedio (altura en cm) de los corales blandos registrados en los cuatro sectores del parche arrecifal Cuevones. E.E. = error estándar; † las medidas corresponden a la cobertura. †† especies registradas en todos los sectores. . Negritas corresponden a los valores máximos. *Por su forma de crecimiento se midió la cobertura lineal como en el caso de los corales pétreos.

Especies	Impactado n=4		R1 n=4		R2 n=5		R3 n=5	
	abundancia absoluta (relativa)	Talla promedio (1 E.E.)	Abundancia absoluta (relativa)	Talla promedio (1 E.E.)	Abundancia absoluta (relativa)	Talla promedio (1 E.E.)	Abundancia absoluta (relativa)	Talla promedio (1 E.E.)
<i>Erythropodium caribaeorum</i> *	1 (1.92)	6 [†]	1 (2.86)	12 [†]	2 (2.50)	27.5 [†] (15.500)		
<i>Eunicea mammosa</i> †	44 (84.62)	18.68 (0.910)	25 (71.43)	20.16 (1.695)	56 (70.00)	18.34 (0.178)	59 (72.84)	19.97 (0.833)
<i>Gorgonia flabellum</i>			2 (5.71)	28.00 (18.000)	1 (1.25)	45.00		
<i>Gorgonia ventalina</i>			1 (2.86)	25.00	2 (2.50)	33.00 (0.522)	1 (1.23)	64.00
<i>Muricea muricata</i>	1 (1.92)	16.00					1 (1.23)	20.00
<i>Muriceopsis flavida</i> †	3 (5.77)	12.67 (3.180)	5 (14.29)	13.40 (0.748)	5 (6.25)	20.60 (0.910)	6 (7.41)	26.50 (6.428)
<i>Plexaura flexuosa</i> †	2 (3.85)	26.50 (1.500)	1 (2.86)	22.00	5 (6.25)	31.00 (0.576)	7 (8.64)	25.00 (3.748)
<i>Plexaura homomalla</i>	1 (1.92)	14.00			1 (1.25)	45.00	1 (1.23)	21.00
<i>Plexaurella</i> sp					1 (1.25)	33.00		
<i>Pseudoplexaura</i> sp					1 (1.25)	23.00	1 (1.23)	15.00
<i>Pseudopterogorgia americana</i>					1 (1.25)	38.00	2 (2.47)	30.00 (1.000)
<i>Pseudopterogorgia bipinnata</i>					2 (2.50)	16.50 (1.354)		
<i>Pterogorgia citrina</i>					1 (1.25)	16.00	1 (1.23)	13.00
<i>Pterogorgia guadalupensis</i>					2 (2.50)	22.50 (1.160)	2 (2.47)	18.00 (2.000)
Colonias agrupadas	52 (100)		35 (100)		80 (100)		81 (100)	

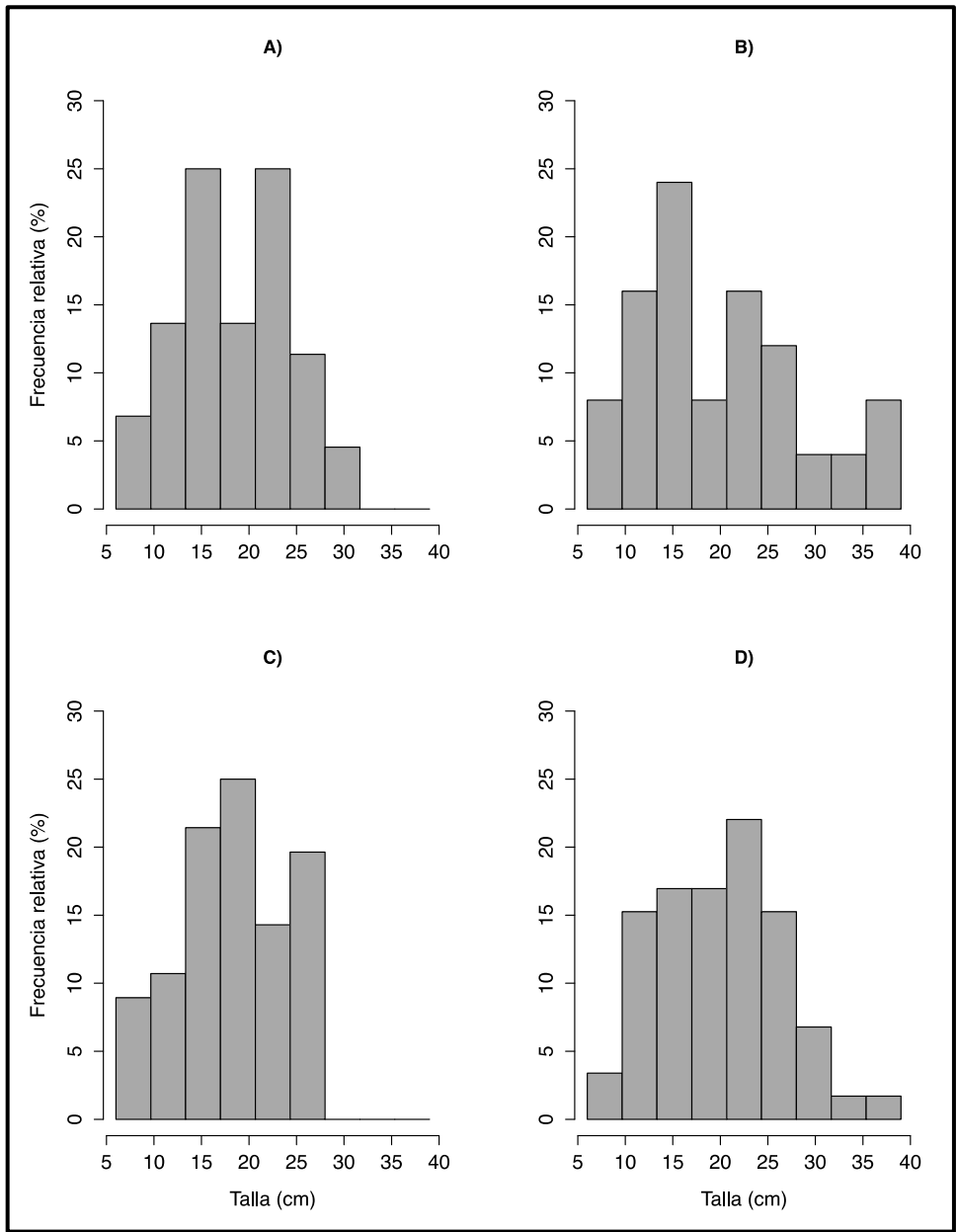


FIGURA 92. Distribución de tallas de *Eunica mammosa* en los cuatro sectores propuestos para Cuevones. A) Sector de impacto sin restauración, B) R1, C) R2 y D) R3.

TABLA 27. Variables de respuesta medidas en los diferentes sectores de Cuevones con los resultados del ANOVA o PERMANOVA.

Variable de respuesta	F y (Pseudo-F)	Significancia
Índice de Rugosidad (n = 18)	6.150	**
Abundancia (n = 18)	1.472 [†]	n. s.
Cobertura lineal de corales pétreos(n = 18)	1.346 [†]	n. s.
Cobertura estimada de tejido vivo (n = 18)	1.495 [†]	n. s.
Altura de corales blandos (n = 18)	1.290 [†]	n. s.
Cobertura de algas (n = 89)	4.022 [†]	*
Densidad de <i>Diadema antillarum</i> (n = 18)	4.178	*

*P < 0.05, **P < 0.01, n. s. no significativo. (Pseudo): valores de Pseudo-F en los casos de los análisis multivariados[†].

Reclutas de coral y cobertura de algas

Se encontraron 32 reclutas pertenecientes a cuatro géneros (Tabla 26). Los reclutas de corales pétreos ocurrieron en menor frecuencia (9 colonias), mientras *Eunicea*, el único octocoral presente, contribuyó con 23 colonias dominando los sectores R1 a R3. *Porites* dominó en el sector de impacto y *Eunicea* presentó su mayor frecuencia en el sector R3.

Las macroalgas carnosas (MAC) fue el grupo con la mayor abundancia relativa en los sectores, exceptuando R2, donde las calcáreas ramificadas dominaron. El PERMANOVA para la comunidad de algas mostró diferencias significativas entre sectores y la prueba pareada mostró que el sector R2 es diferente del resto (Figura 93). La densidad de adultos del erizo *D. Antillarum* varió entre 0.8 ind 1m⁻² (R3) y 7.2 ind 1m⁻² (R1) (Figura 94). La densidad de erizos sólo fue significativamente diferente entre R1 y R3 (Tabla 27, Figura 94). Dada la baja densidad de erizos juveniles no se hizo la prueba estadística. La correlación entre la densidad de erizos y la cobertura de macroalgas no fue significativa (r = 0.288, P > 0.05).

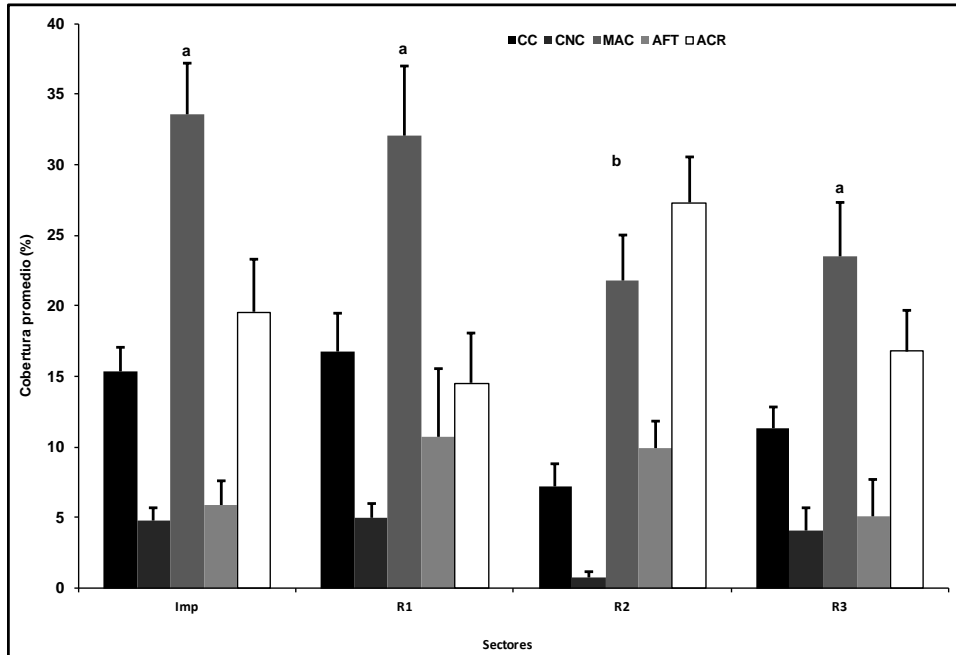


FIGURA 93. Cobertura relativa promedio (+ 1 E.E.) de los 5 grupos de algas registrados en el parche arrecifal Cuevones. CC = Algas costrosas calcáreas, CNC = algas costrosas no coralinas, MAC = macroalgas carnosas, AFT = algas filamentosas de tapete, ACR = algas calcáreas ramificadas. Letras diferentes denotan diferencias significativas. Abreviaturas de los sectores como en la figura E1.

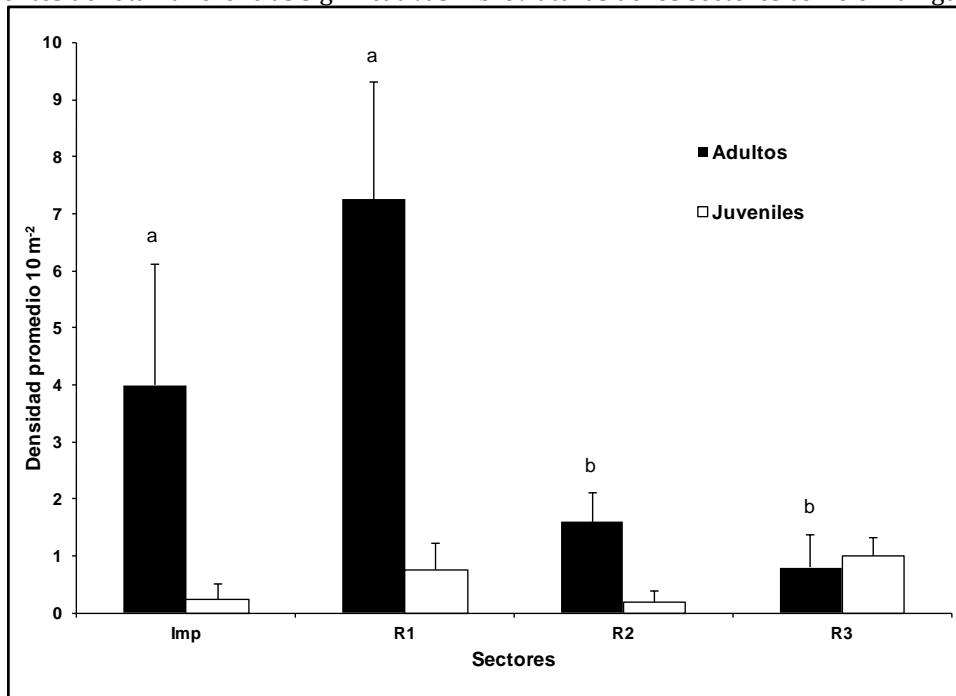


FIGURA 94. Densidad promedio (+ 1 E.E.) de adultos (barras negras) y juveniles (barras blancas) de *D. Antillarum* en los cuatro sectores de Cuevones. Diferentes letras denotan diferencias significativas, sólo para adultos. Las abreviaturas para los sectores son las mismas que en Figura E1.

b) Escala 1m²

Variación espacio temporal de la estructura de la comunidad de corales adultos (evaluación semestral)

Como consecuencia de las variaciones en las condiciones ambientales en el sitio, se obtuvo un número diferente de cuadros muestreados en cada ocasión (Tabla 28). Con excepción de los cuadros registrados en Octubre de 2015, se hizo una selección aleatoria de 20 cuadros para cada temporada que lo requirió y posteriormente los análisis.

TABLA 28. Número de cuadros muestreados por temporada por sección en Cuevones.

Fecha de muestreo	No. de cuadros muestreados		Número de especies registradas	
	Impacto	Referencia	Impacto	Referencia
Febrero de 2013	27	31	13	14
Agosto de 2013	20	20	13	16
Febrero de 2014	38	39	10	13
Septiembre de 2014	40	40	10	14
Octubre de 2015	12	21	9	11

Porites astreoides fue la especie dominante en todos los muestreos. La cobertura estimada de tejido vivo para esta especie en el sector de impacto osciló entre 775.16 cm² m⁻² en febrero de 2014 y 1011.00 cm² m⁻² en agosto de 2013 (Figura 95). Para el sector de referencia la cobertura estimada de tejido vivo obtuvo un mínimo de 921.08 cm² m⁻² en octubre de 2015 y un máximo de 1606.51 cm² m⁻² en febrero de 2013 (Figura 96). Para el caso de las especies clave en el funcionamiento arrecifal, se encontró que en la porción de impacto *Acropora palmata* tuvo su máxima cobertura en el mes de septiembre de 2014 con 176.18 cm² m⁻² y el mínimo en el mes de febrero de 2013 con 5.89 cm² m⁻² (Figura 95). Para el sector de referencia la cobertura máxima ocurrió en febrero de 2013 con 1328.50 cm² m⁻² y el mínimo en febrero de 2014 con 66.31 cm² m⁻² (Figura 96). Para *Acropora cervicornis* el máximo de cobertura estimada de tejido vivo en el sector de impacto ocurrió en febrero de 2013 con 171.79 cm² m⁻² y el mínimo en los muestreos del año 2014 sin registro de cobertura (Figura 96). En el sector de referencia, *A. Cervicornis* registró una cobertura máxima de 80.86 cm² m⁻² mientras que el mínimo ocurrió en octubre de 2015 con 5.65 cm² m⁻².

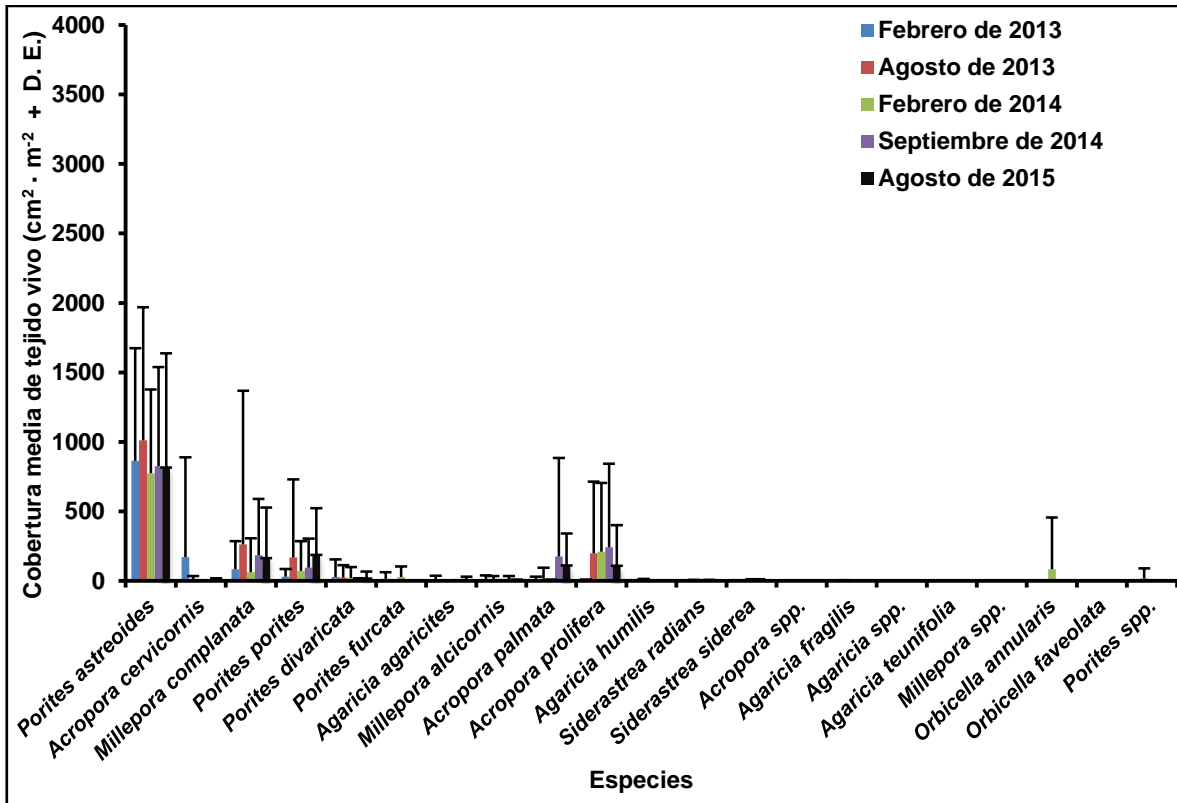


FIGURA 95. Porcentaje de cobertura de tejido vivo dentro de los cuadros en la zona de impacto sin restauración.

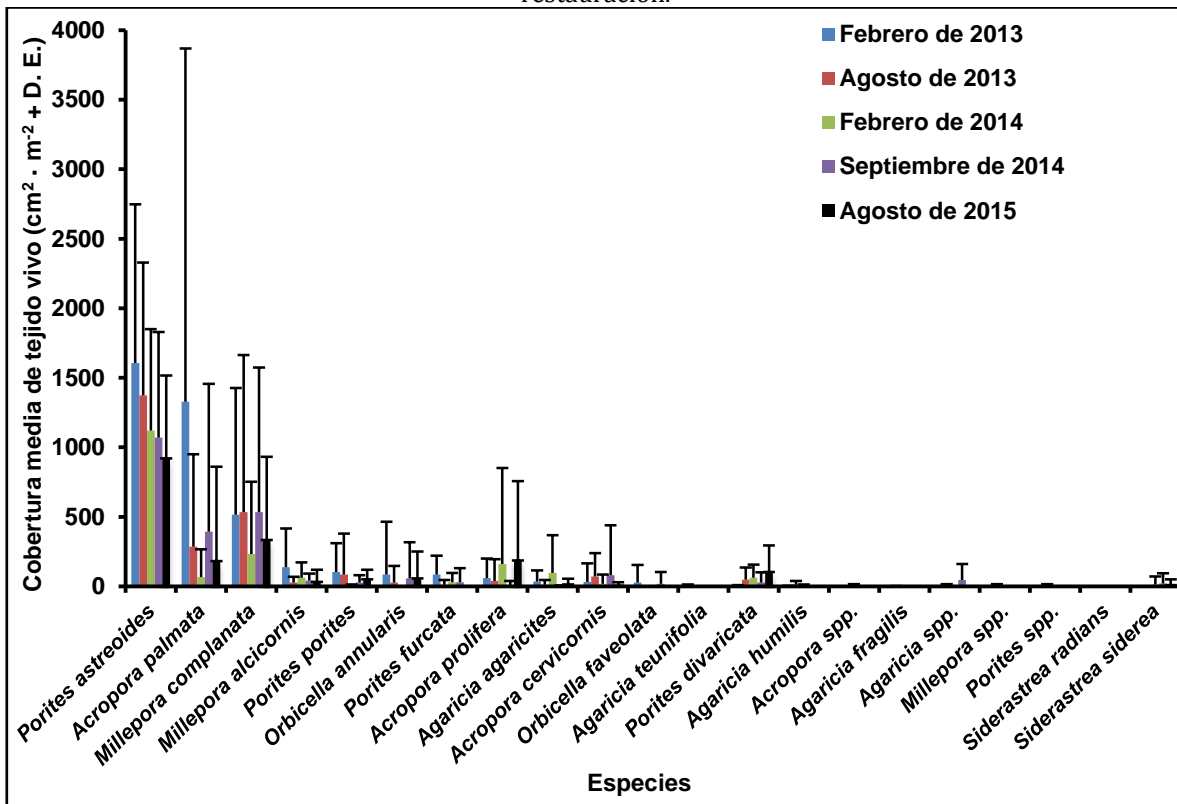


FIGURA 96. Porcentaje de cobertura de tejido vivo dentro de los cuadros en la zona de referencia.

El análisis multivariado de la cobertura estimada de tejido vivo en cada muestreo mostró que no existe un patrón que permita reconocer el sitio de impacto del sitio de referencia (Figura 97). Asimismo, el análisis multivariado tampoco mostró un patrón de cambio entre las diferentes fechas de muestreos (Figura 97). La cantidad de variación encontrada en la cobertura estimada de tejido vivo y la contribución grande de *P. astreoides* en esta variable pueden ser la principales causas de la falta de diferencias. En el caso de la abundancia por cuadro para todas las especies de corales (pétreos y blandos), tampoco se encontró un patrón que sugiriera un cambio en la abundancia (Figura 98).

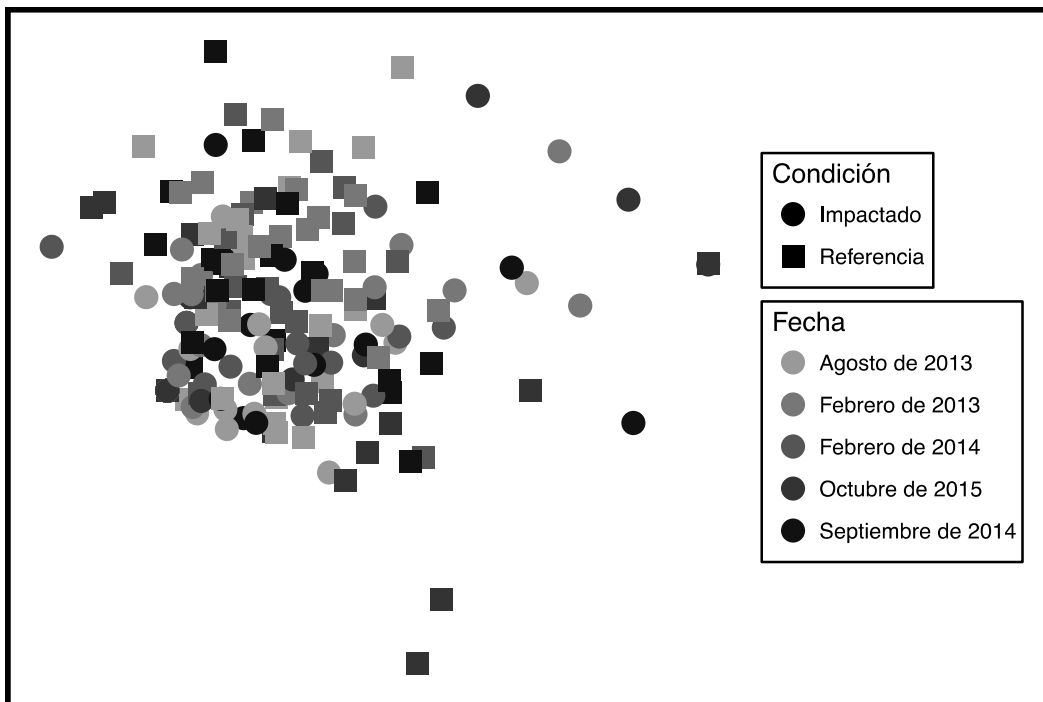


FIGURA 97. NMDS de la cobertura de tejido estimado de tejido vivo de corales pétreos en los sectores de impacto y referencia en los periodos de muestreo.

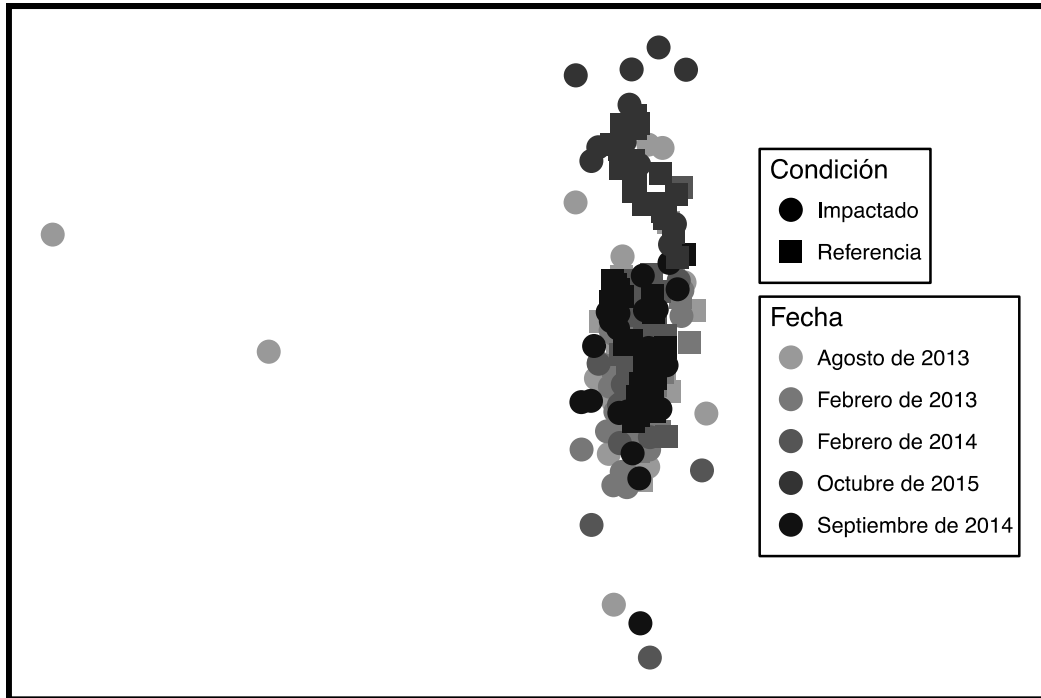


FIGURA 98. NMDS de la abundancia de corales pétreos y blandos en los sectores de impacto y referencia en los periodos de muestreo.

c) Comparación entre los sectores de impacto sin restauración, impacto con restauración y referencia (Evaluación semestral)

Riqueza específica

El número de especies para cada una de las porciones se muestra en la Tabla 29. La porción de restauración presentó la mayor riqueza con 20 especies.

TABLA 29. Riqueza específica registrada en cada periodo de muestreo en las tres secciones del parche arrecifal muestreada.

	Cuevones		
	Impacto	Referencia	Restauración
Total	16	16	20

Corales adultos

Respecto a la abundancia de colonias entre los sitios de impacto sin restauración y referencia no se encontraron diferencias en los cuatro muestreos. En cuanto a la porción de impacto con restauración el efecto de la restauración fue el esperado; un incremento gradual, y significativo para agosto de 2015, en la abundancia como resultado de la introducción de fragmentos (Figura 99a). En contraste, la cobertura de tejido vivo en los tres sectores no muestra diferencias significativas entre los diferentes periodos de estudio (Figura 99b). En todos los sectores, *Porites astreoides* fue la especie dominante con densidades entre 4 y 8 col m⁻²; las especies clave en la construcción de la matriz arrecifal (i.e., *Acropora palmata*, *Acropora cervicornis*) se registraron en densidades menores (Figura 100). En el sector de restauración el efecto de la introducción de las colonias se ve reflejado por un incremento en la abundancia promedio de *Acropora cervicornis*.

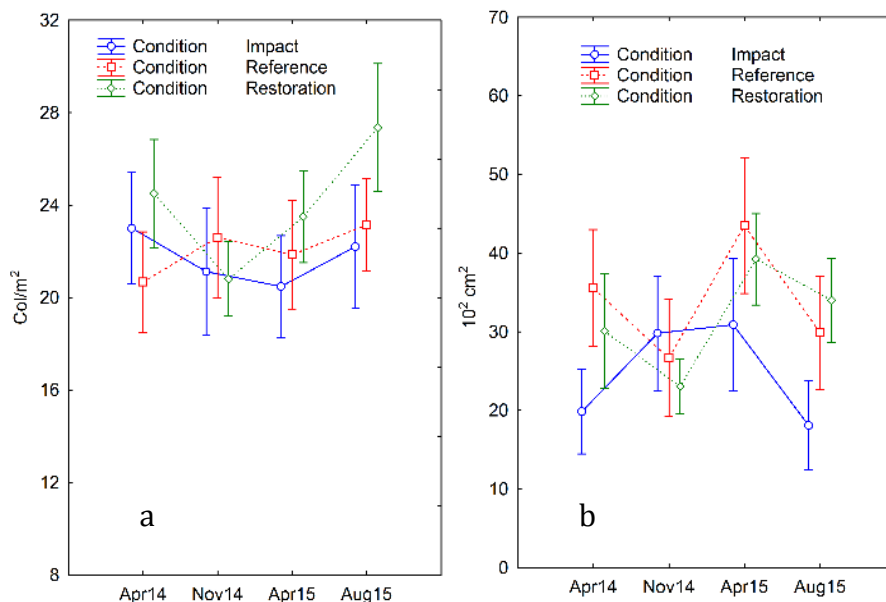


FIGURA 99. Abundancia de colonias (a) y cobertura de tejido vivo estimada en los sectores de referencia, impacto sin restauración e impacto con restauración.

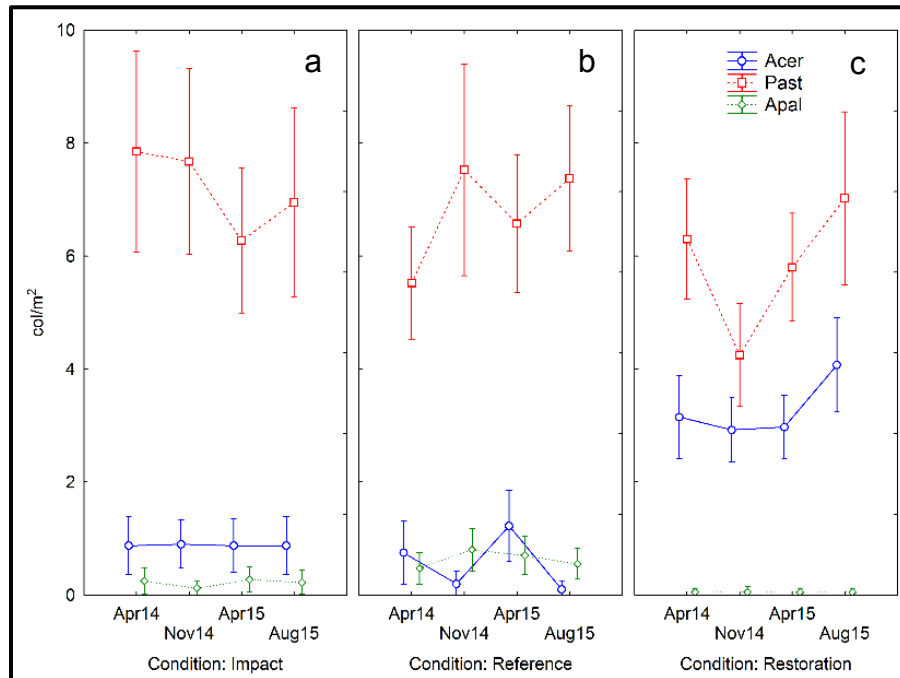


FIGURA 100. Abundancia de las especies dominantes de los sectores bajo diferentes condiciones en Cuevones.

En cuanto a la dominancia en la cobertura estimada de tejido vivo para cada condición (Figura 101). *Porites astreoides* fue la especie dominante en el sector de impacto (Figura 101a), *Acropora palmata* y *P. astreoides* tuvieron una contribución semejante en el sector de referencia (Figura 101b) y para el sector de impacto con restauración *P. astreoides* y *A. cervicornis* co-dominaron con un incremento de esta última debido a la introducción de colonias (Figura 101c). En el sector de referencia, *A. palmata* presentó la mayor variación de todos los sectores. Esto es resultado de que en el sitio muy pocos cuadros de muestreo contaron con colonias, lo que se ve reflejado en la densidad promedio (Figura 100b). Algo similar ocurrió en el sector impactado con restauración, donde la abundancia promedio de *A. palmata* fue menor que en el sector de referencia (Figura 100c).

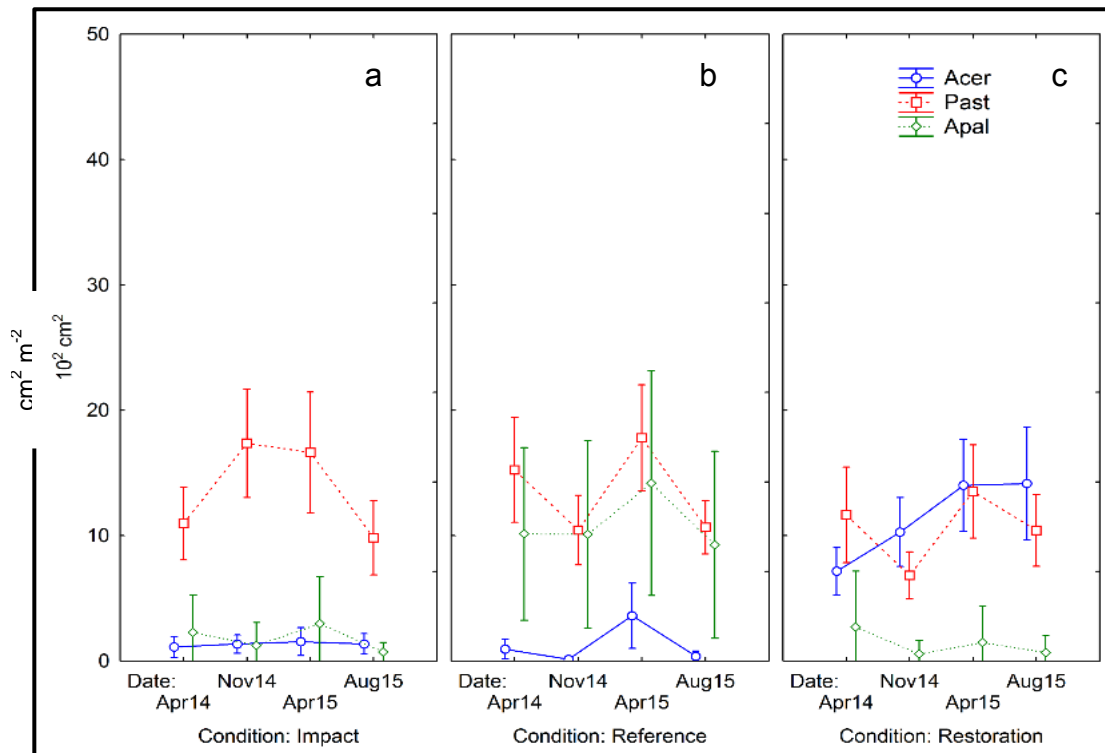


FIGURA 101. Cobertura estimada de tejido vivo de las tres especies dominantes en los tres sectores de estudio en Cuevones.

Reclutamiento

En Cuevones el reclutamiento tuvo comportamientos similares en los tres sectores. Se encontró una reducción en la densidad entre noviembre de 2014 y abril de 2015, posteriormente se registró un leve aumento en agosto de 2015 (Figura 102). Con los datos registrados, el sector de impacto con restauración activa no muestra señales de un incremento en la densidad de reclutas respecto a los sectores de referencia e impacto sin restauración. El género con mayor representación en la comunidad de reclutas fue *Porites*.

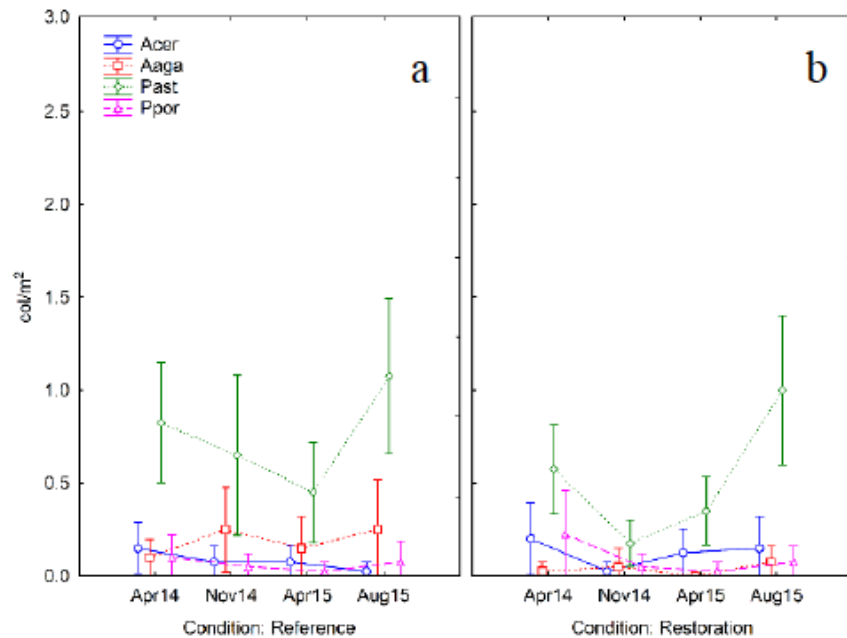


FIGURA 102. Densidad de reclutas en las tres porciones del Parche arrecifal Cuevaones. a) sector de referencia y b) sector de impacto.

Densidad de erizos (evaluación semestral)

La densidad de *D. antillarum* entre los tres sectores mostró que en el sector de referencia fue más alta hasta noviembre de 2014 (Figura 103). En abril de 2015 la densidad se redujo por debajo de 1 individuo m^{-2} , alcanzando los niveles de los otros sectores. Los sectores de impacto, sin importar si se restauró, mostraron densidades por debajo de 1 individuo m^{-2} en todas las ocasiones de muestreo (Figura 103).

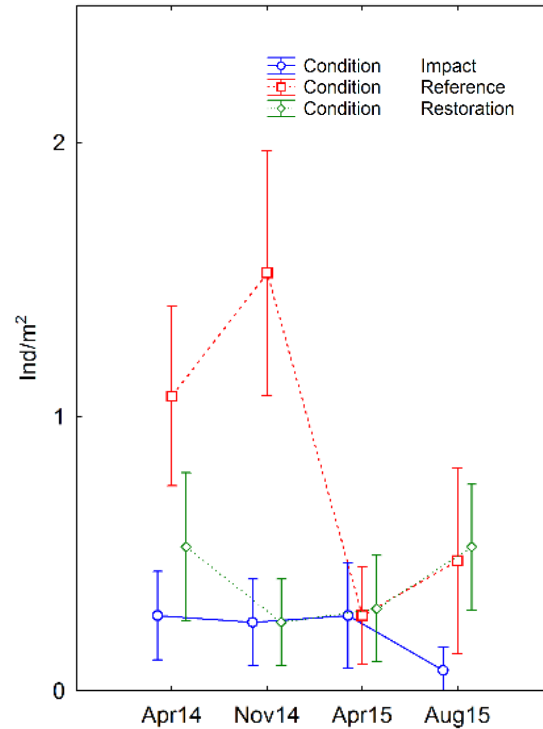


FIGURA 103. Densidad de *Diadema antillarum* en los tres sectores estudiados en Cuevones

Densidad de erizos (evaluación bimestral)

En el muestreo bimestral de las unidades permanentes, en la sección de referencia e impacto sin restauración, se encontró que el sector de referencia muestra el mayor número de erizos por muestreo (Tabla 30). En el análisis ponderado, el sitio de impacto fue el que en todas las ocasiones registró las menores densidades de erizos, con un intervalo entre 0 y 0.25 ± 0.129 E.E. ind. m^{-2} (Figura 104). En el sitio de referencia la densidad promedio de erizos oscilo entre 0 y 1.85 ± 0.499 ind. m^{-2} (Figura 105). Dadas las diferencias en el número de erizos encontrados entre sitios para cada temporada no fue necesario hacer análisis más rigurosos (i.e., no se hicieron análisis estadísticos).

TABLA 30. Abundancia total de erizos (adultos y juveniles) en los cuadros permanentes para los sectores de impacto y referencia.

Periodo de evaluación	Impacto		Referencia	
	Adultos	Juveniles	Adultos	Juveniles
Febrero de 2013	1	0	12	1
Abril de 2013	0	0	11	0
Junio de 2013	0	1	3	0
Agosto de 2013	2	1	13	2
Octubre de 2013	0	0	1	0
Diciembre de 2013	1	0	9	0
Febrero de 2014	15	0	33	1
Abril de 2014	0	0	8	0
Junio de 2014	2	0	13	0
Septiembre de 2014	2	0	27	0
Octubre de 2014	1	0	15	0
Diciembre de 2014	1	1	43	9
Abril de 2015	2	0	6	2
Octubre de 2015	0	1	7	0

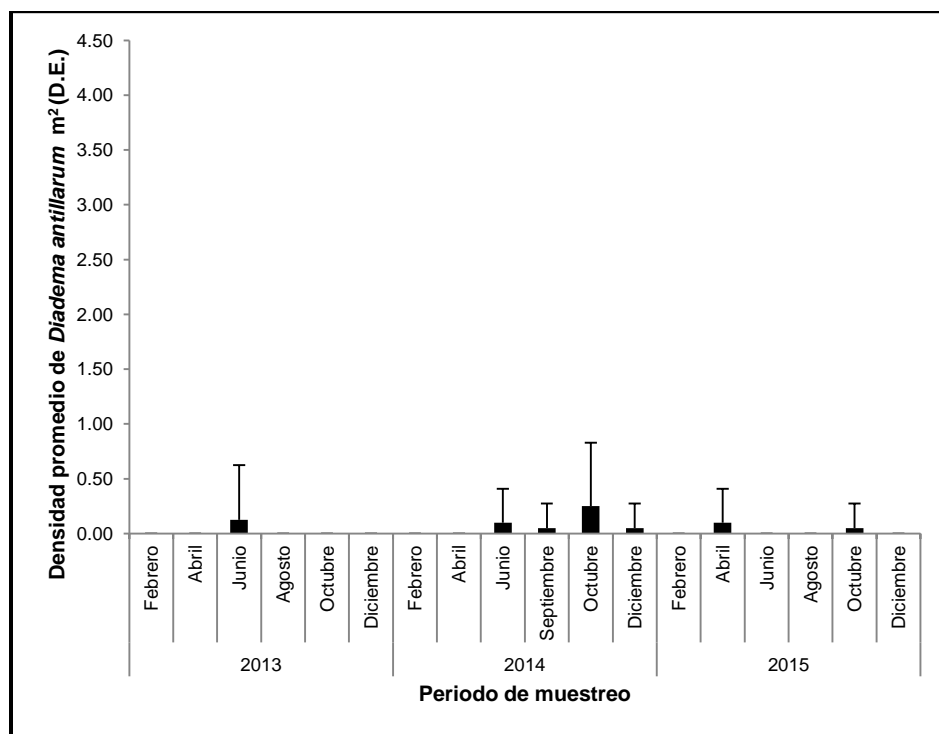


FIGURA 104. Densidad promedio bimestral de *Diadema antillarum* en el sector de impacto sin restauración de Cuevones.

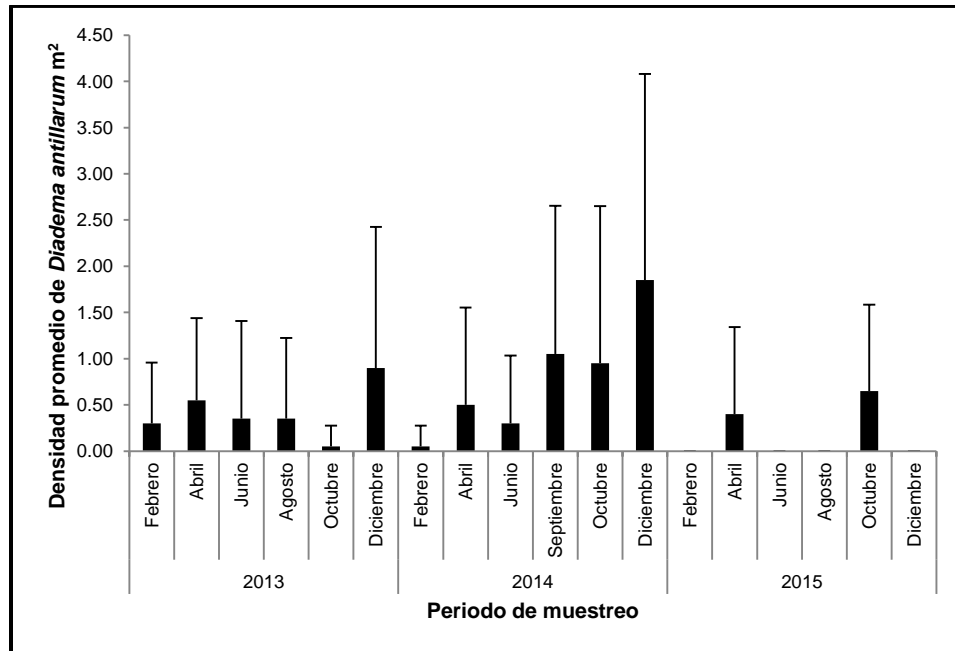


FIGURA 105. Densidad promedio de *Diadema antillarum* en el sector de referencia de Cuevones.

d) Cobertura algal

Comparación entre los sitios de impacto, impacto con restauración e impacto sin restauración (evaluación semestral)

El análisis de la cobertura de algas en los tres sectores de Cuevones mostró que las macroalgas carnosas son el grupo con mayor cobertura en todos los sitios (Figura 106). Entre los sitios no se halló evidencia de diferencias de la cobertura en este grupo algal.

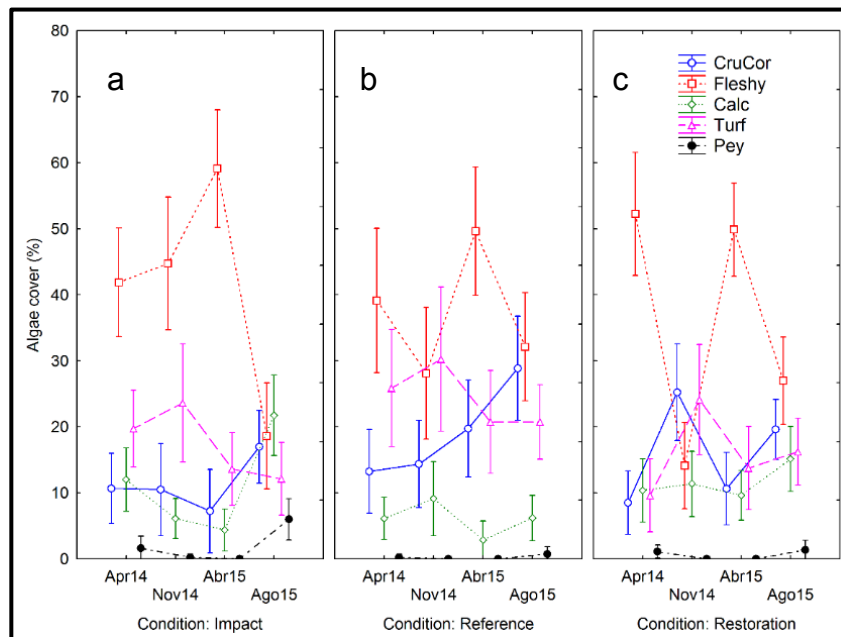


FIGURA 106. Cobertura promedio de los grupos algales en los diferentes sectores de Cuevones.

e) Escala 10 × 10 cm (evaluación bimestral)

Cobertura algal

En la escala fina no encontramos un patrón de variación en la cobertura de los diferentes grupos entre sectores y tiempo de muestreo. Las macroalgas carnosas y los tapetes algales son los grupos con mayor cobertura durante todos los muestreos. Las algas calcáreas incrustantes y la matriz calcárea, potenciales sitios de establecimiento para las larvas de coral, fueron los que presentaron coberturas promedio menores al 25% (Figura 107).

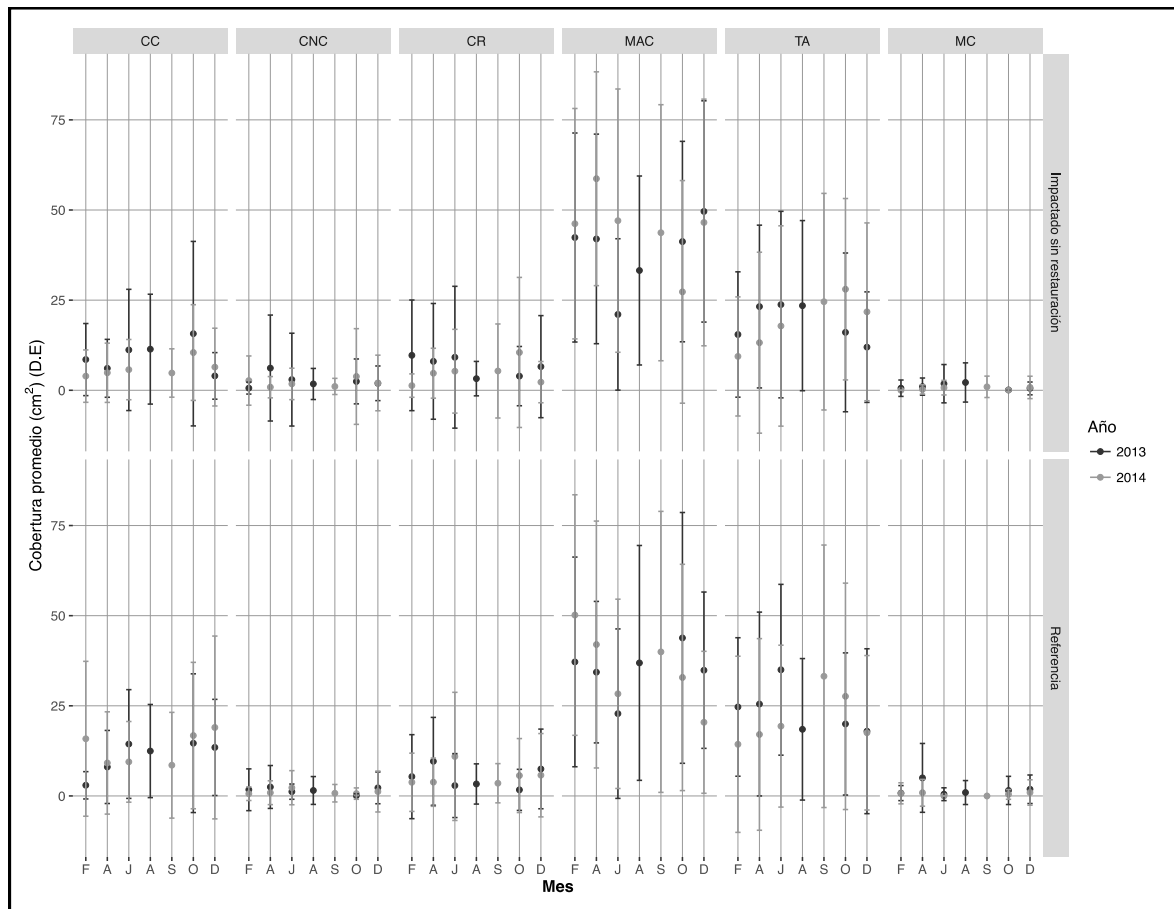


FIGURA 107. Cobertura promedio de los grupos algales y matriz calcárea medidos en dos sectores del parche arrecifal Cuevones en el periodo 2013-2014. CC: Algas incrustantes calcáreas, CNC: algas incrustantes no calcáreas, CR: algas calcáreas ramificadas, TA: algas filamentosas de tapete y MC: matriz calcárea.

Reclutamiento

Para el periodo de 2013-2014, la densidad de reclutas, calculada a partir del diseño balanceado, mostró que *Porites* es el género encontrado con mayor frecuencia y cuyas densidades fueron mayores. En contraste, el género *Acropora* fue encontrado con menor frecuencia (Figura 108). Durante el mismo periodo, con el marcaje permanente y el registro fotográfico, fue posible dar seguimiento al destino de 279 reclutas. *Porites* fue el

género con mayor contribución con 189 individuos, seguido de Millepora, Agaricia y Acropora con 34, 29 y 27 individuos respectivamente.

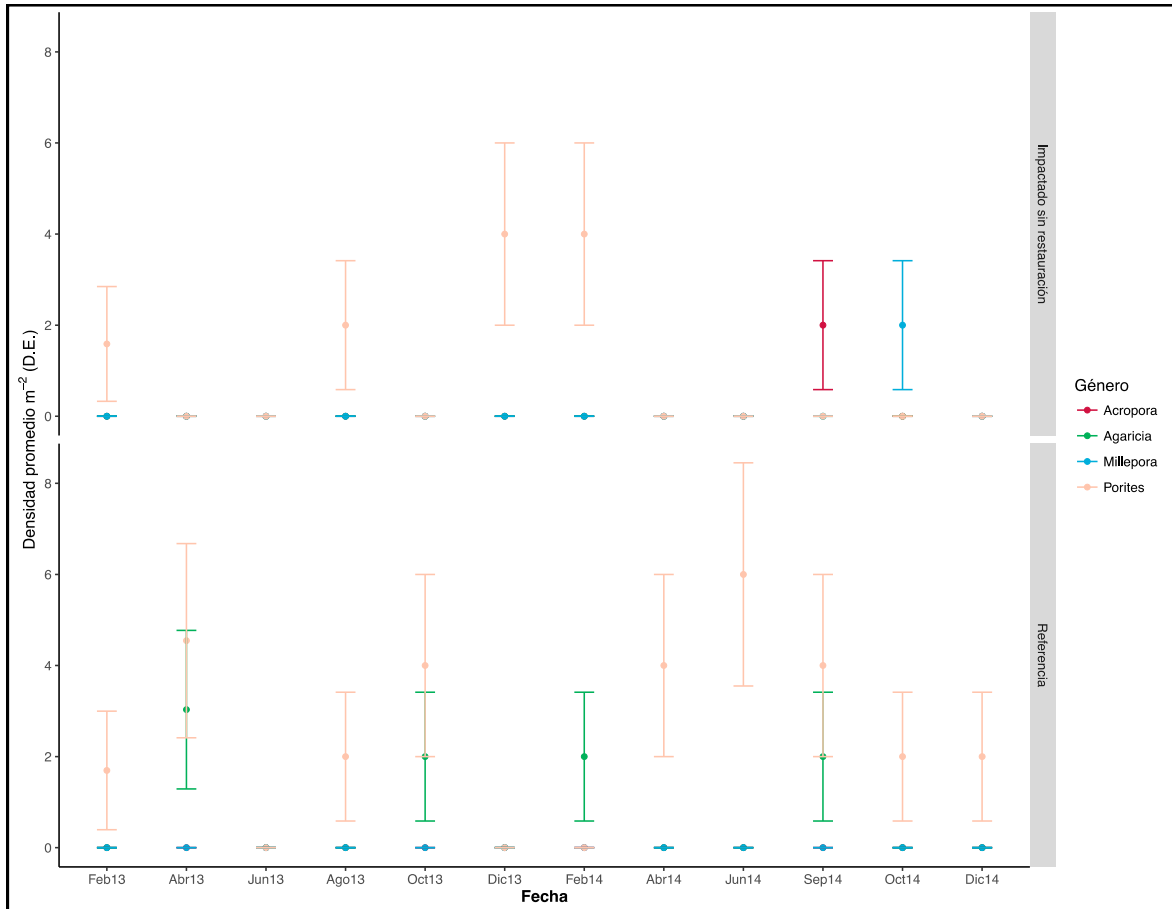


FIGURA 108. Densidad promedio de reclutas de los géneros de corales pétreos encontrados en los dos sectores estudiados bimestralmente en Cuevones.

Porites fue el género que registró el número de reclutas con mayor número de observaciones consecutivas. De los 189 reclutas registrados, 2 fueron registrados durante 22 meses consecutivos (11 muestreos bimestrales) (Figura 109). La mayoría de los reclutas (113) fueron registrados sólo una vez. Para el género *Millepora*, 31 de los 34 reclutas sólo fueron vistos una vez y sólo uno fue registrado en un periodo de 18 meses (Figura 110). Para *Agaricia*, 17 de los 29 reclutas fueron vistos sólo una vez mientras 2 fueron observados 18 meses y 2 más por 20 meses (Figura 111). En el caso de *Acropora*, 23 de los 27 individuos sólo fueron registrados una vez y un ejemplar sobrevivieron 18 meses (Figura 112).

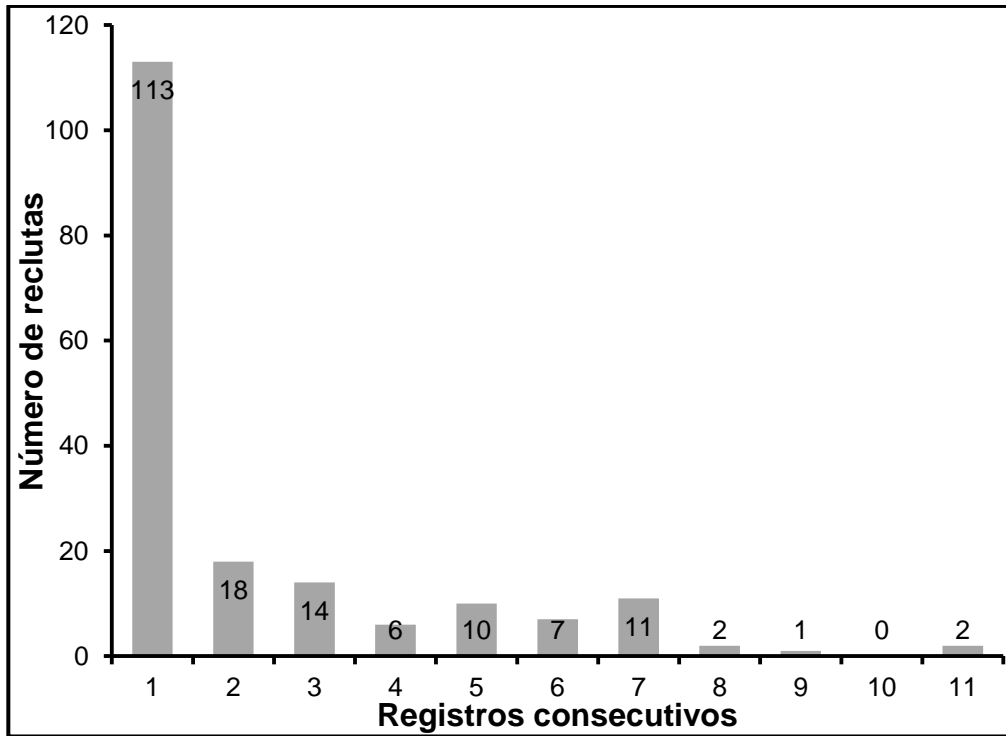


FIGURA 109. Número de registros consecutivos de los reclutas del género Porites para los cuales fue posible seguir su trayectoria en dos años de muestreo consecutivo.

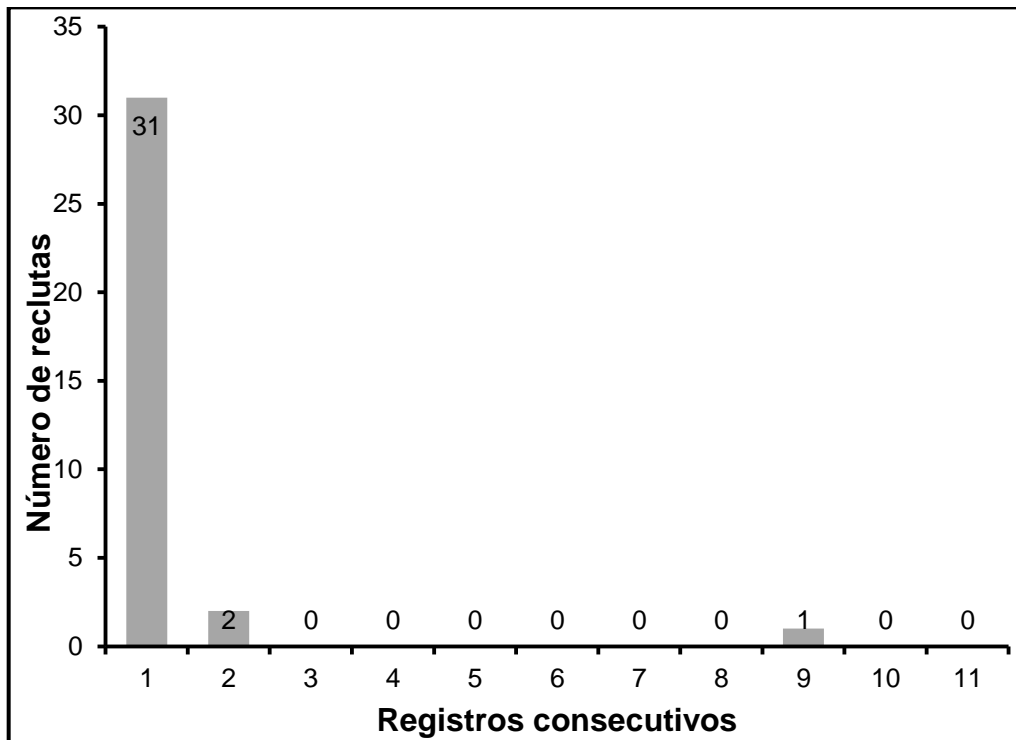


FIGURA 110. Número de registros consecutivos de los reclutas del género Millepora para los cuales fue posible seguir su trayectoria en dos años de muestreo consecutivo.

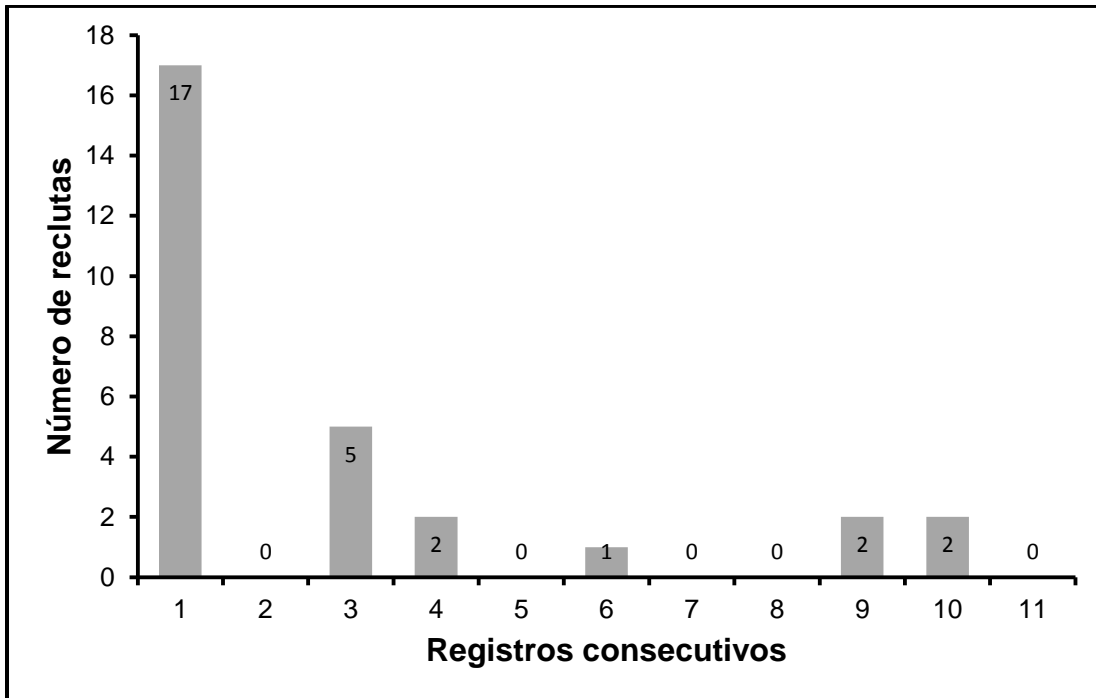


FIGURA 111. Número de registros consecutivos de los reclutas del género Agaricia para los cuales fue posible seguir su trayectoria en dos años de muestreo consecutivo.

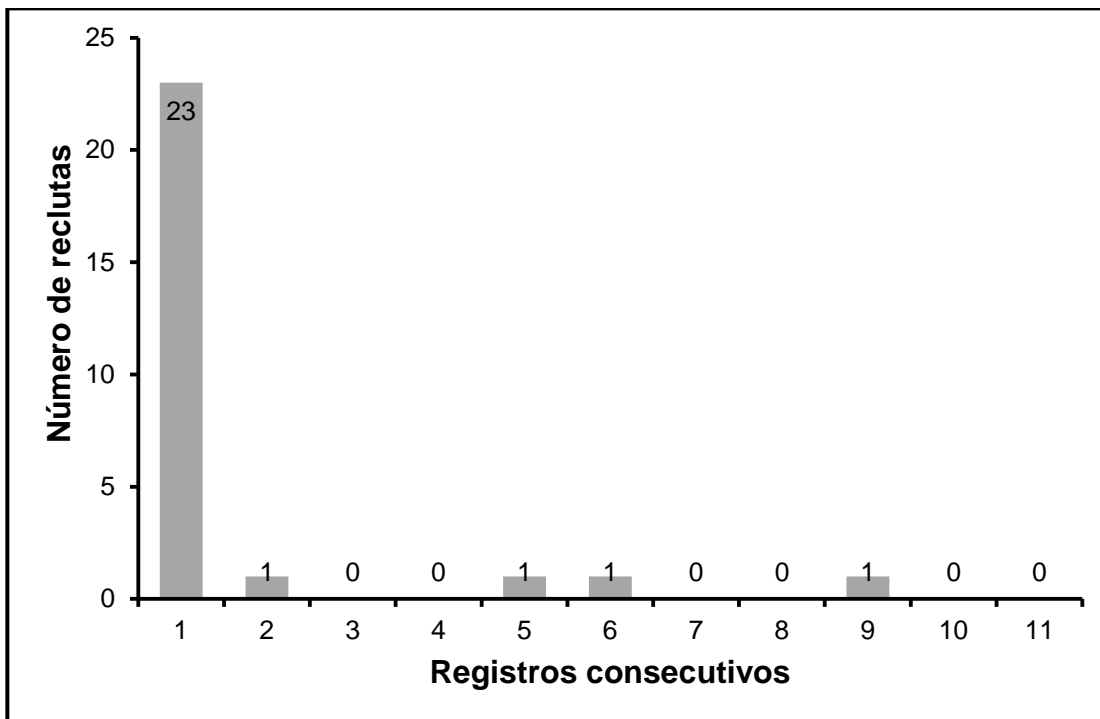


FIGURA 112. Número de registros consecutivos de los reclutas del género Acropora para los cuales fue posible seguir su trayectoria en dos años de muestreo consecutivo.

f) Monitoreo marzo 2018

Métodos:

- Escala de 1m²

De los cuadros permanentes establecidos para la ejecución del proyecto, se seleccionaron de manera aleatoria 20 cuadros, 10 para el sector de impacto y 10 para el sector no impactado por el encallamiento. Dentro de cada cuadro se midieron e identificaron las colonias de corales pétreos. Cada una fue medida en su diámetro máximo y perpendicular al centímetro más cercano. Dentro de cada cuadro, también se registraron los individuos del erizo *Diadema antillarum*.

- Escala de 10 x 10 cm

En los mismos cuadros seleccionados para el registro de las colonias adultas, se colocó un cuadro de PVC de 50 x 50 cm con divisiones cada 10 cm, lo que representa 25 unidades de 100 cm² cada una. De estas unidades, se seleccionaron 5 de manera aleatoria y en cada unidad, con la ayuda de una gradilla graduada cada centímetro, se midió la cobertura (cm²) de los cinco grupos funcionales de algas: macroalgas carnosas (MAC), algas calcáreas ramificadas (CR), algas filamentosas (AF), algas costrosas coralinas (CC) y algas costrosas no coralinas (CnC). Adicionalmente, dentro de cada unidad de 100 cm² se hizo una búsqueda de reclutas de coral y su diámetro máximo fue medido.

Resultados:

- Escala de 1m²

Se registraron 4 especies de coral, *Porites astreoides* fue la que más contribuyó tanto en la cobertura como en la abundancia de las colonias dentro de los cuadros en los dos sectores (Figuras 113 y 114). Aunque *Acropora palmata* se encontró en los dos sectores, su contribución fue ligeramente mayor en el sector de no impacto y en términos generales no domina la comunidad. En cuanto a la abundancia de erizos, sólo se registraron 2 individuos adultos en el sector de impacto.

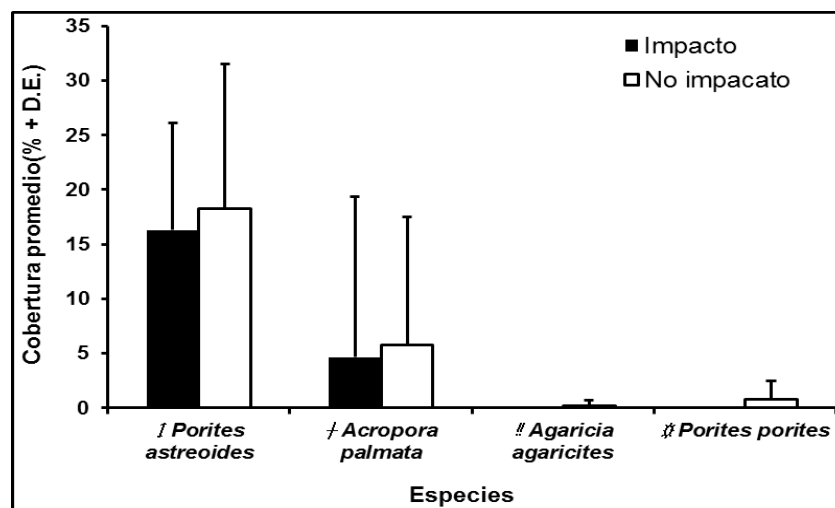


FIGURA 113. Cobertura promedio de los corales pétreos en los sectores de impacto y no impacto en el parche arrecifal Cuevones.

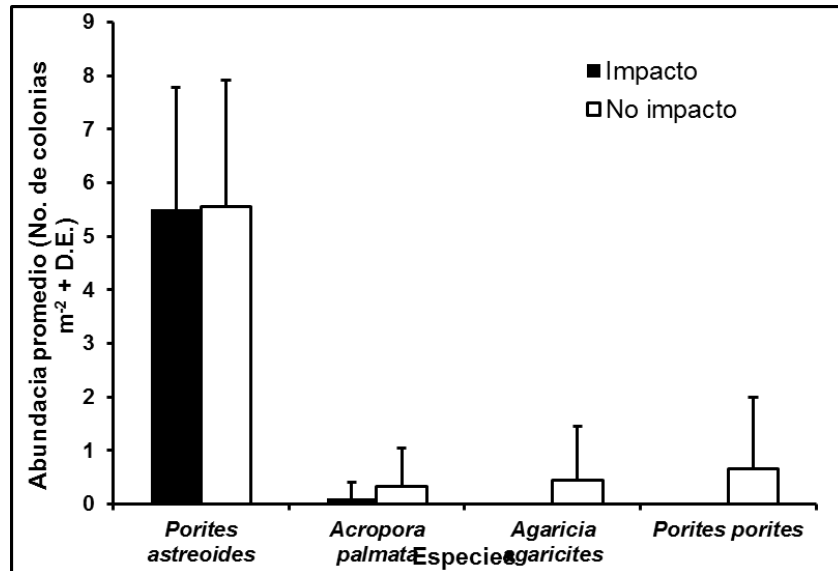


FIGURA 114. Abundancia promedio de colonias en los sectores de impacto y no impacto en el parche arrecifal Cuevones.

- Escala de 10 × 10 cm

En cuanto a la contribución de la cobertura de algas, se encontró que las macroalgas carnosas (MAC) ocuparon el 40 % de la cobertura registrada en ambos sectores, mientras que las algas costrosas calcáreas (CC) tuvieron una cobertura promedio cercana a 10 % en ambos sectores (Figura 115).

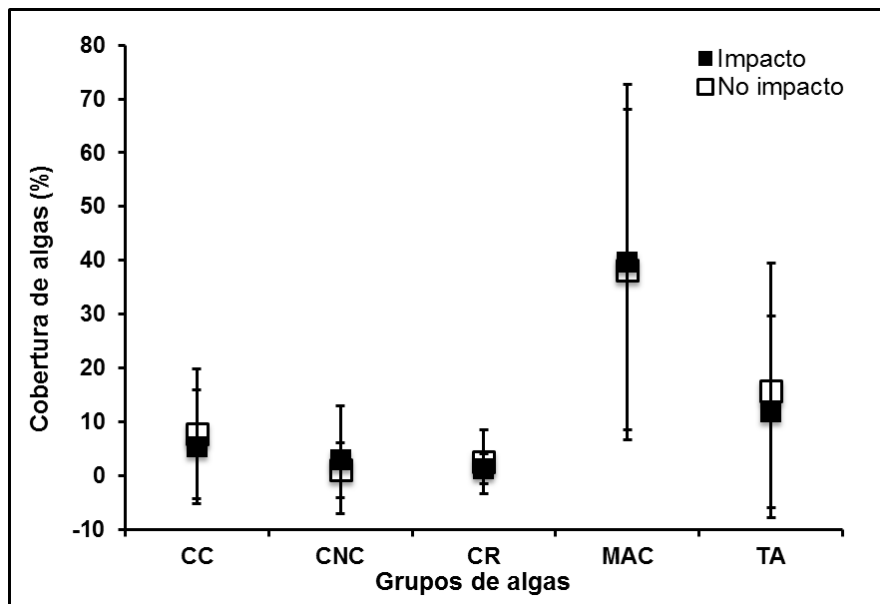


FIGURA 115. Porcentaje de cobertura de los cinco grupos algales en los sectores de impacto y referencia en el parche arrecifal Cuevones.

En cuanto a los reclutas, en esta ocasión sólo se registraron 2 individuos del género *Porites* en el sector de no impacto.

- Cambios en los procesos sucesionales

En comparación, los patrones comunitarios son consistentes con los resultados previos, obtenidos durante la ejecución del proyecto. La comunidad de corales sigue estando dominada por las especies oportunistas, con una contribución dominada por las colonias de *P. astreoides* tanto en el número de colonias como en el área que cubren. La cobertura de las MAC sigue siendo la más alta con una cobertura de aprox. 40 %.

En cuanto al reclutamiento, los datos son consistentes con lo reportado previamente, la abundancia de las colonias de reclutas es baja, en este caso extremadamente, y siendo *Porites* el único género registrado. Algo similar ocurrió con los erizos ya que sólo 2 individuos fueron encontrados en el sector de referencia; aunque se observaron individuos de este erizo fuera de las unidades seleccionadas. A la luz de estos resultados, las conclusiones generadas en el proyecto son válidas todavía. El proceso sucesional desarrollado en el Parche Arrecifal Cuevones mantiene una ruta en la que se favorece el desarrollo de un estado alternativo dominado por las macroalgas carnosas y los corales que con mayor frecuencia se registran son los que tienen estrategias de vida oportunista.

4.6. Reproducción sexual

4.6.1. Evento reproductivo para obtención de reclutas sexuales en laboratorio

En total se realizaron 89 campañas de seguimiento de eventos de reproducción sexual en seis fechas distintas: en septiembre del 2012, julio y agosto del 2013, en agosto del 2014; y finalmente en agosto y septiembre del 2015, distribuidas en seis sitios, correspondientes a tres especies: *A. palmata*, *O. faveolata* y *D. labyrinthiformis*. Las campañas se realizaron en las fechas señaladas en la Tabla 31.

TABLA 31. Rango de fechas de salidas y campañas realizadas durante el desarrollo del proyecto de restauración para recolectar gametos de corales de desove masivo.

Fecha	Sitio	Número de campañas	Involucrados	Especie
2012, Sep 02 al 04	La Bocana Chica	3	UNAM	<i>Acropora palmata</i>
2013, Jul 24 al 29	Limonos, La Bocana Chica, Punta Venado	14	UNAM, INAPESCA, PNAPM, XCARET.	<i>Acropora palmata</i>
2013, Ago 23 al Sep 1	La Bocana Chica, Punta Venado	16	UNAM, INAPESCA, PNAPM, XCARET.	<i>Acropora palmata</i> , <i>Orbicella faveolata</i> , <i>Diploria labyrinthiformis</i>
2014, Ago 12 al 18	El Bajito, Limonos, La Bocana Chica, Punta Venado	24	UNAM, INAPESCA, PNCOIMPCPN, PNAPM, XCARET, SECORE, UABC, UdeG	<i>Acropora palmata</i>
2015, Ago 02 al 12	El Bajito, Limonos, La Bocana Chica, Punta Venado	26	UNAM, INAPESCA, PNCOIMPCPN, PNAPM, XCARET, SECORE, UABC, UdeG	<i>Acropora palmata</i> , <i>Orbicella faveolata</i> , <i>Diploria labyrinthiformis</i>
2015, Sep 02 al 03	El Bajito, Limonos,	6	UNAM, INAPESCA, PNCOIMPCPN	<i>Acropora palmata</i>

Se puede apreciar que se atendieron por lo menos 36 eventos reproductivos entre el mes de septiembre del 2012 al septiembre del 2015 en un total de 89 campañas (Tabla 32).

TABLA 32. Registro de eventos reproductivos de tres especies de corales constructoras de arrecifes durante el periodo 2012-2015.

Rango de fechas de desove	Sitio	Número de eventos reproductivos	Especie
2012, sep 03 al 04	La Bocana Chica	2	<i>Acropora palmata</i>
2013, jul 26 al 29	Limonos, La Bocana Chica, Punta Venado	6	<i>Acropora palmata</i>
2013, ago 23 al sep 1	La Bocana Chica, Punta Venado	9	<i>Acropora palmata</i> , <i>Orbicella faveolata</i> , <i>Diploria labyrinthiformis</i>
2014, ago 12 al 18	El Bajito, Limonos, La Bocana Chica, Punta Venado	13	<i>Acropora palmata</i> , <i>Orbicella faveolata</i> , <i>Diploria labyrinthiformis</i>
2015, ago 03 al 05	Limonos, La Bocana Chica	6*	<i>Acropora palmata</i>

En la zona estudiada se observó un gradiente de desove de *Acropora palmata* de norte a sur, ya que en general en los arrecifes bajo observación en Cancún y en la Unidad Arrecifal Limones los desoves se han visto a 1 o 2 noches después de la luna llena, en el Arrecife La Bocana en Puerto Morelos *A. palmata* desova entre 3 a 5 días después de la luna llena mientras que en Punta Venado el desove de esta especie se ha registrado entre 6 y 8 noches después de la luna llena (Banaszak, obs. pers. del 2007 al 2016) (Figura116).

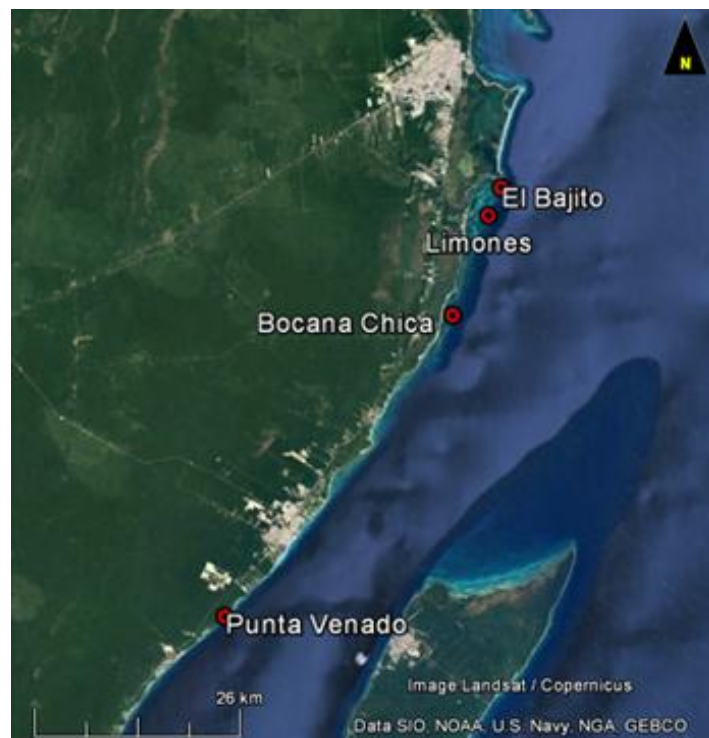


FIGURA 116. Mapa de los sitios de monitoreo de desoves y colecta de gametos del coral *Acropora palmata*.

El éxito de fertilización de los gametos para los diferentes sitios fue mayor a 90% y en muchas ocasiones llegaba a los 99%. El cultivo de los embriones y larvas se llevó a cabo en tres instalaciones: la UASA de la UNAM, el CRIP-PM de INAPESCA y en el Acuario de Xcaret. Se obtuvieron millones de larvas de *A. palmata* las cuales se asentaron en sustratos artificiales: tapones de cemento y placas de cerámica.

El asentamiento de las larvas se realizó sobre sustratos de cemento pre-acondicionados en el mar por seis semanas. Los conteos iniciales de los reclutas en la UNAM se llevaron a cabo de cinco a ocho días después del asentamiento de las larvas en cada campaña (Tabla X).

4.6.2. Entrega de reclutas sexuales a INAPESCA y XCARET

Los reclutas de *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata* obtenidos de las diferentes campañas fueron repartidos entre las instituciones: XCARET, INAPESCA y UNAM, para su cultivo en sus sistemas de acuarios respectivamente (Tabla 33).

TABLA 33. Tabla de reparto de reclutas de *Acropora palmata* (Apal) y de *Orbicella faveolata* (Ofav) en las campañas 2012-2015

	2012	2013	2014	2015
XCARET	393 Apal 37 Ofav	257 Apal	7340 Apal	4770 Apal
UNAM	1213 Ofav	475 Apal	5982 Apal	7889 Apal
INAPESCA	1111 Ofav	731 Apal	0	3500* Apal
Total	2754	1463	13322	16149

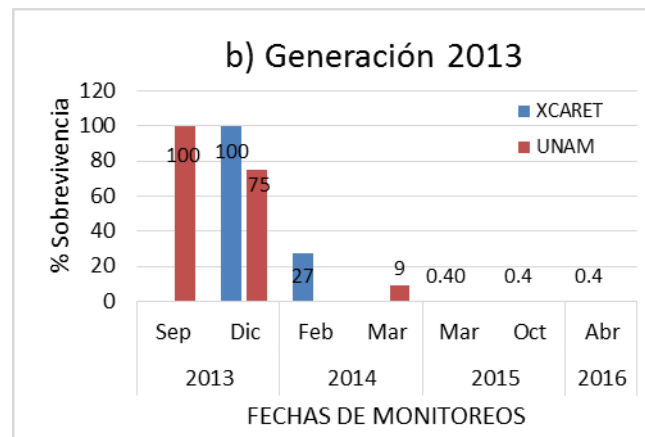
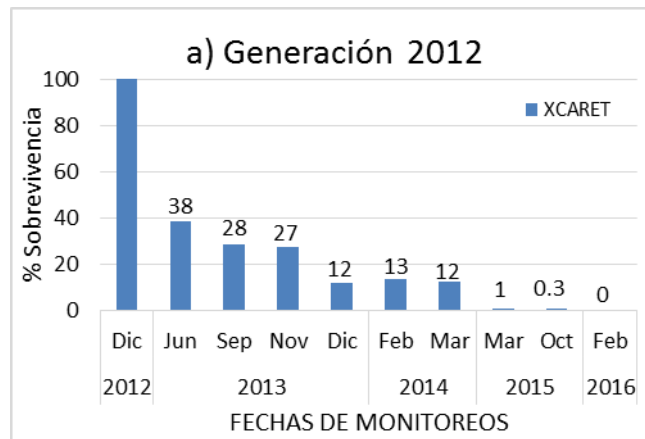
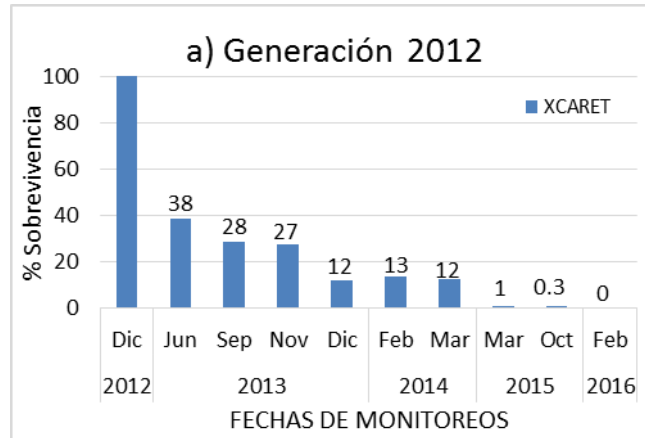
*Además se entregaron aproximadamente 30,000 larvas de *A. palmata* a INAPESCA para el subsecuente desarrollo en sus acuarios.

Cabe señalar que, en 2015, no hubo entrega de reclutas sexuales a XCARET debido a que además de los reclutas producidos en la UNAM, se produjeron reclutas sexuales en Xcaret con apoyo del personal de la UNAM. Además, en la UNAM ya se contaba con instalaciones apropiadas.

4.6.3. MONITOREO trimestral de sobrevivencia y desarrollo de reclutas sexuales

a) La sobrevivencia en acuarios terrestres

El análisis de los monitoreos trimestrales en donde se dió seguimiento a la sobrevivencia y el crecimiento de los reclutas sexuales fue realizado para los reclutas cultivados en acuarios, en el vivero marino y en el arrecife donde algunos reclutas sexuales fueron sembrados finalmente. El análisis sólo incluye datos de UNAM y Xcaret ya que no contamos con los datos de INAPESCA. Se observa que tanto en acuarios de XCARET como en los de UNAM los organismos sobreviven en un alto porcentaje hasta el mes de diciembre entre 75% y 100%, en enero y febrero se observa un decremento importante en la supervivencia, alcanzando valores menores a 25% en la mayoría de los casos. En las generaciones de reclutas de coral *Acropora palmata* del 2012, 2013 y 2015 es evidente la supervivencia menor al 1% antes de ser ingresados a un vivero marino. La generación 2014 no sobrevivió en ninguno de los sistemas de acuarios y no se ingresaron al vivero marino (Figura 117).



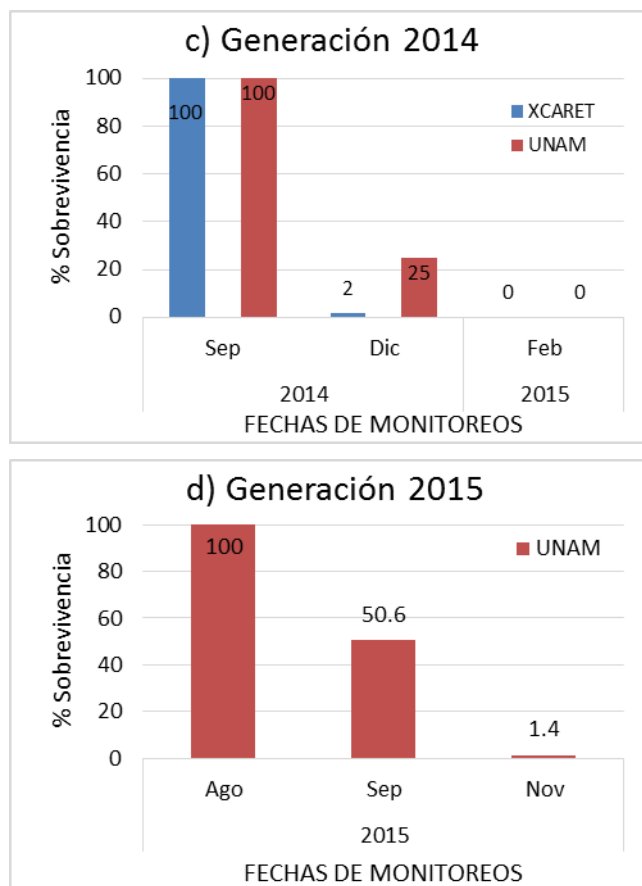


FIGURA 117. Porcentaje de supervivencia de reclutas sexuales de *Acropora palmata* cultivados en los sistemas de acuarios de Xcaret (azul) y UNAM (naranja); a) muestra los datos de la generación 2012 relativos al monitoreo de diciembre 2012, b) 2013, c) 2014 y d) 2015.

La alta mortalidad de reclutas en las diferentes generaciones, fue a consecuencia de un bajo porcentaje de inoculación de los simbiontes, a pesar de los múltiples intentos de inoculación. La falta de simbiontes incorporados por los corales propició que estos tuvieran poca energía para su metabolismo. Se observó un crecimiento muy bajo y una muy lenta o nula división de los pólipos, por lo que, con el paso del tiempo, a pesar de los cuidados y la aplicación de alimento vivo y comercial, la supervivencia de los reclutas sexuales fue disminuyendo.

El crecimiento de las reclutas sexuales de la Generación 2012 se muestra en la Tabla 34 y las Figuras 118 y 119, y se aprecia que el incremento del número de pólipos y el área de tejido es exponencial.

TABLA 34. Crecimiento de reclutas sexuales de la Generación 2012 cultivados en el sistema de acuarios de la UNAM.

Edad de Recluta (meses)	Fecha monitoreo	N (reclutas)	Área promedio	Pólipos promedio	EE área	EE pólipos
0			0	0	0	0
1	12-dic-12	81	6.05	5.7125	2.6558	0.9211

2	18-ene-13	132	20.577	11.3802	2.1595	0.749
3	27-feb-13	34	50.072	21.1515	4.1351	1.4342
5	18-abr-13	40	121.425	47.9211	3.8534	1.3365

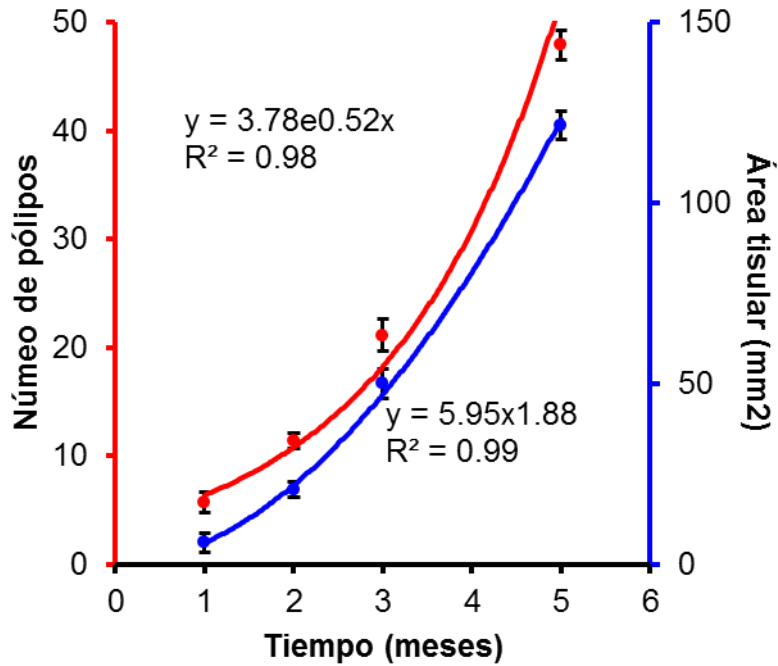


FIGURA 118. Número de pólipos (rojo) y área tisular (azul) en reclutas de *Acropora palmata* en función del mes. El mes uno corresponde a tres meses después del asentamiento de las larvas (diciembre de 2012) y el mes cinco corresponde a siete meses después (abril de 2013). Barras de error = error estándar de la media.

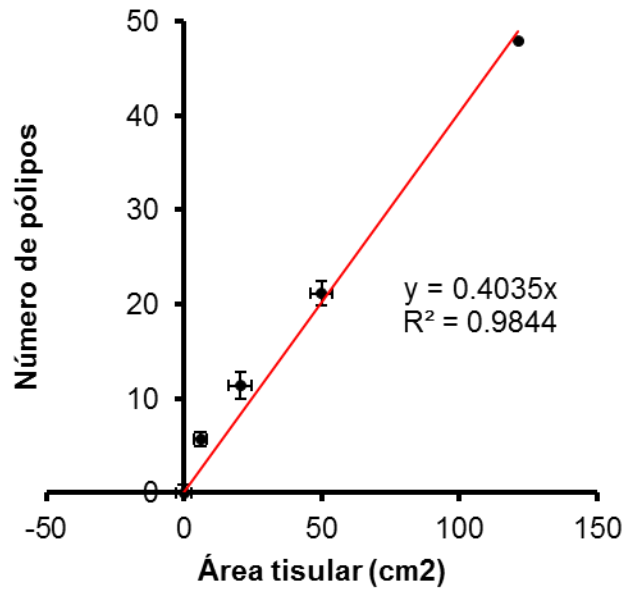


FIGURA 119. Relación entre el número de pólipos y área tisular de reclutas de *Acropora palmata* entre tres y cinco meses después del asentamiento de las larvas. Barras de error = error estándar de la media.

b) La supervivencia en viveros marinos

Se construyeron dos viveros marinos: uno ubicado en el sitio Las Ruinas cerca de XCARET y otro en el sitio denominado El Spa dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Los datos claramente mostraron que la sobrevivencia es muy alta para reclutas que se mantuvieron por 18 meses en viveros terrestres antes de transferirlos a un vivero marino como se demuestra en la Figura 120 de la Generación 2012.

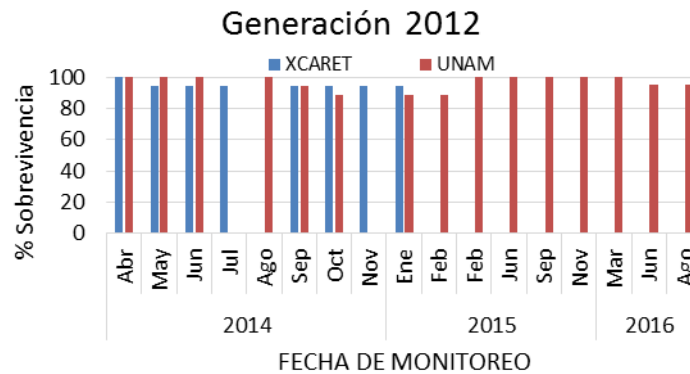


FIGURA 120. Porcentaje de sobrevivencia de reclutas sexuales de la Generación 2012 en viveros marinos de Xcaret (azul) y de la UNAM (rojo).

Sin embargo, para los reclutas de la Generación 2013 (Figura 121) que fueron transferidos a los 8 meses de edad, la mortalidad fue muy alta tanto para los reclutas cultivados en Xcaret (Azul) como para aquellos cultivados en la UNAM (Naranja). Esta mortalidad fue consecuencia de que durante los 8 meses del cultivo de estos corales, los días nublados fueron predominantes, causando bajas intensidades de radiación solar, irradiancias demasiado bajas para el buen funcionamiento de los simbioses y proveer energía suficiente en forma de carbohidratos a los corales.

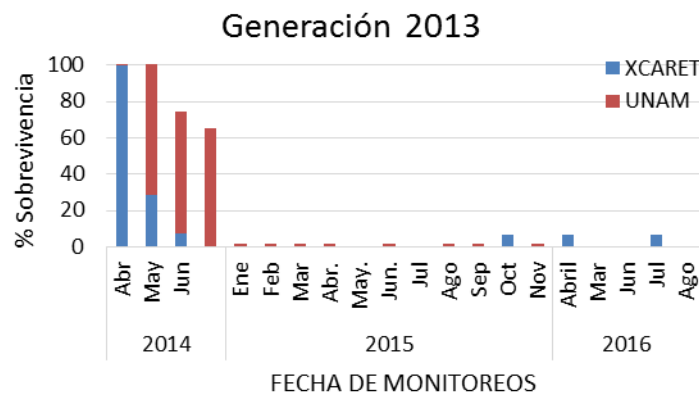


FIGURA 121. Porcentaje de sobrevivencia de reclutas sexuales de la Generación 2013 en viveros marinos de Xcaret (azul) y de la UNAM (rojo).

Debido a que no hubo reclutas sexuales que sobrevivieron de la Generación 2014 no se muestran los resultados. Para los reclutas de la Generación 2015 (Figura 122), el 44 % se transfirieron al vivero marino de la UNAM a una edad muy joven (dos semanas post-asentamiento) para determinar si tomando simbioses directamente del medio ambiente incrementaba la sobrevivencia. El 56 % de los reclutas restantes se mantuvieron en los

acuarios de UNAM, sin embargo, durante el mes de noviembre tuvieron una mortalidad de un 40% por blanqueamiento del tejido por causas aún desconocidas ya que los parámetros de luz, temperatura y la alimentación fueron normales en este periodo. Por esto se decidió colocarlos en el vivero de Picudas, esperando un porcentaje mayor de supervivencia que en los acuarios ya que se observó un resultado positivo en reclutas de la misma especie y edad correspondientes a otro proyecto. Sin embargo, en los meses posteriores estos corales se perdieron a causa de las fuertes corrientes y las inclemencias climáticas ocurridas entre los meses de febrero y marzo del 2016 y no fue posible recuperar ninguna base con reclutas de esta generación.

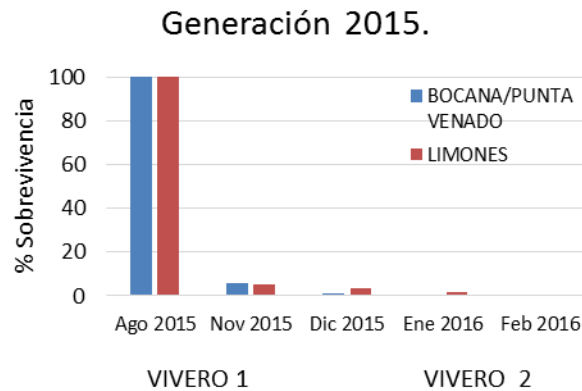


FIGURA 122. Porcentaje de supervivencia de reclutas sexuales de la Generación 2015 en viveros marinos de la UNAM. En azul se muestran reclutas sexuales producidas de desoves de La Bocana Chica y Punta Venado mientras que en naranja se muestran los reclutas producto del desove en Limones.

Debido a que se contaba con reclutas sexuales productos de los desoves del año 2011 que fueron recolectados, cultivados y mantenidos de la misma forma que los reclutas de las generaciones 2012 y 2013, se transfirieron los reclutas a los viveros marinos al mismo tiempo que las otras dos generaciones, teniendo 2.5 años de edad. La supervivencia resultante de esta generación también fue de 100% de las colonias trasplantadas y se observó un crecimiento evidente, igual que la de 2012 (Figura 123).

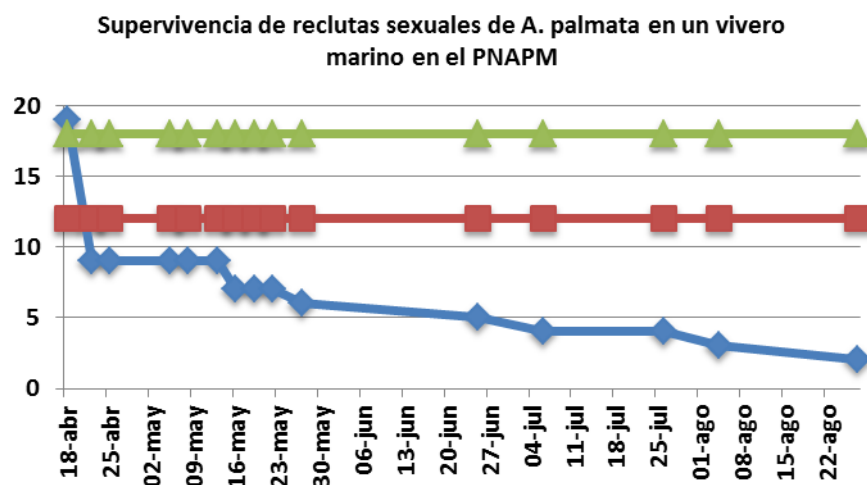


FIGURA 123. Supervivencia de reclutas sexuales de *A. palmata* en un vivero marino en el PNAPM de la Generación 2011 en rojo, de la Generación 2012 en verde y de la Generación 2013 en azul.

Cabe señalar que los datos de la generación 2011 se muestran como complemento ya que fueron obtenidos antes del inicio del proyecto de CONABIO y originalmente no fueron contemplados para su uso en el proyecto de restauración.

El crecimiento de reclutas sexuales de la Generación 2013 en el vivero marino de la UNAM se muestra a continuación en la Figura 124.

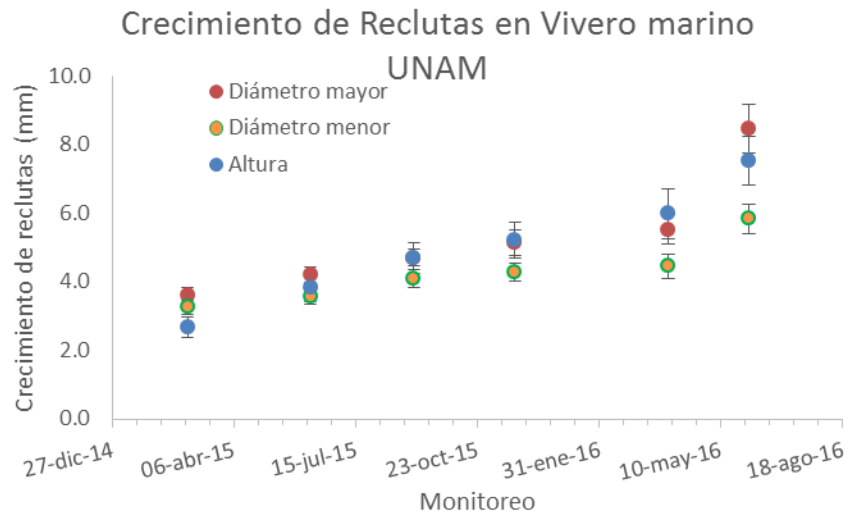


FIGURA 124. Crecimiento de reclutas sexuales de la generación 2013 en el vivero de la UNAM.

El crecimiento de reclutas sexuales de las Generaciones 2012 y 2013 en uno de los sitios de restauración, el arrecife Cuevones, se muestra abajo en la Figura 125.

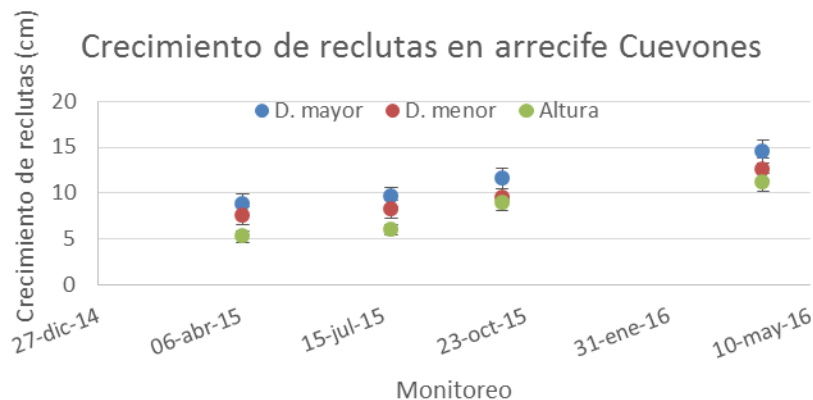


FIGURA 125. Crecimiento de las reclutas sexuales de las generaciones 2012 y 2013 en el arrecife Cuevones, sitio de restauración del proyecto.

El comparativo de las tasas de crecimiento de las reclutas sexuales en el vivero marino versus el arrecife Cuevones muestra que ya sembradas los corales en un ambiente arrecifal tienen tasas de crecimientos mayores a cuando estaban en un vivero marino (Figura 126).

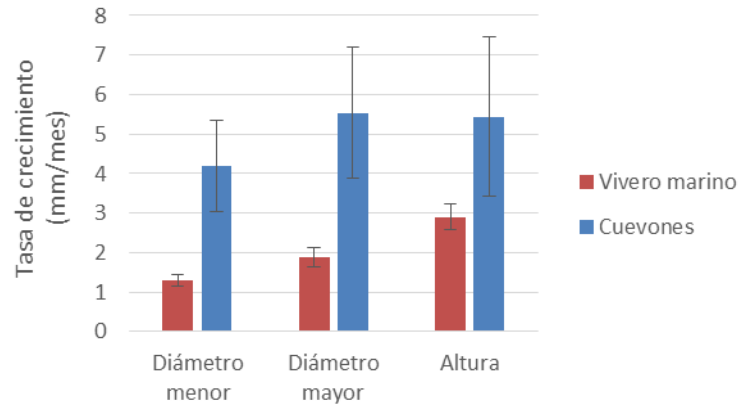


FIGURA 126. Tasas de crecimiento de reclutas sexuales mientras que estaban en el vivero marino de la UNAM (en rojo) en comparación a cuando se sembraron en uno de los sitios de restauración, el arrecife Cuevones.

En la Tabla 35 se muestra la ubicación de los reclutas sexuales sobrevivientes de los desoves del 2011, 2012, y 2013.

TABLA 35. Ubicación de reclutas sexuales de la especie *Acropora palmata* hasta el 2016.

Ubicación	Exhibición XCARET			Vivero UNAM			Arrecife CUEVONES	
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012
Núm. Reclutas de coral	2	0	1	2	22	1	19	10
Último registro	ago-16			ago-16			abr-16	

A continuación, se demuestran fotografías de reclutas sexuales de *Acropora palmata* en el acuario de exhibición de Xcaret (Figura 127), en el vivero marino de la UNAM (Figura 128) y de los reclutas sexuales sembrados en el arrecife Cuevones (Figura 129).

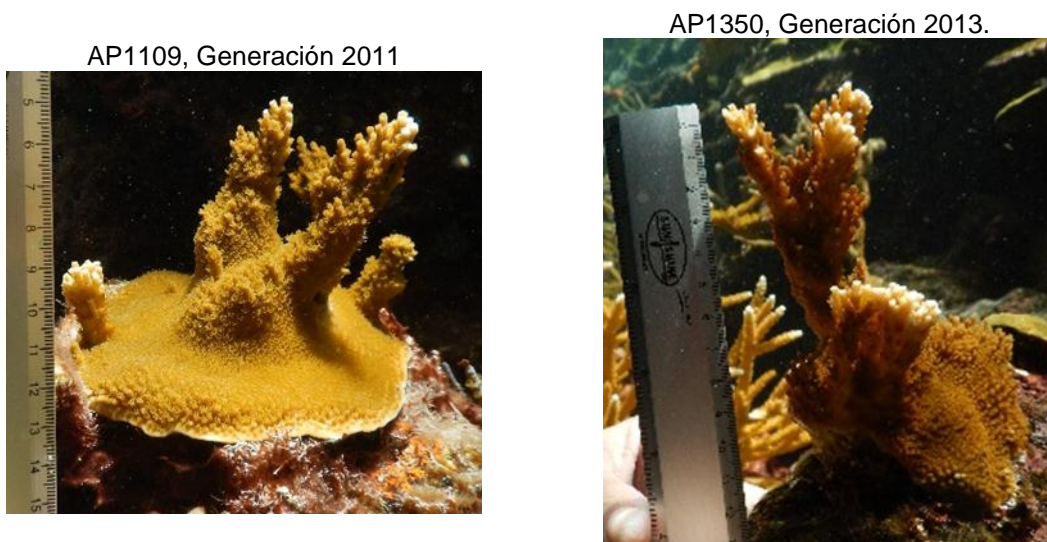
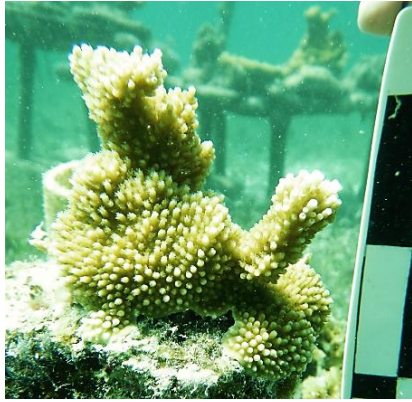
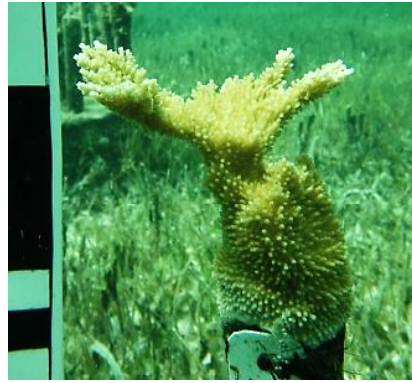


FIGURA 127. Reclutas sexuales de *Acropora palmata* en el acuario de exhibición de Xcaret



AP1107, Generación 2011.

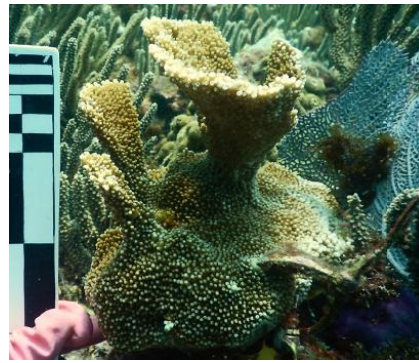


AP1277, Generación 2012.

FIGURA 128. Reclutas sexuales de *Acropora palmata* en el vivero marino UNAM.



AP1221, Generación 2012.



AP1126, Generación 2011.

FIGURA 129. Reclutas sexuales de *Acropora palmata* en Arrecife Cuevones.

Las colonias sembradas en el arrecife de Cuevones continúan con el 100% de supervivencia y con un crecimiento evidente (Figura 130).

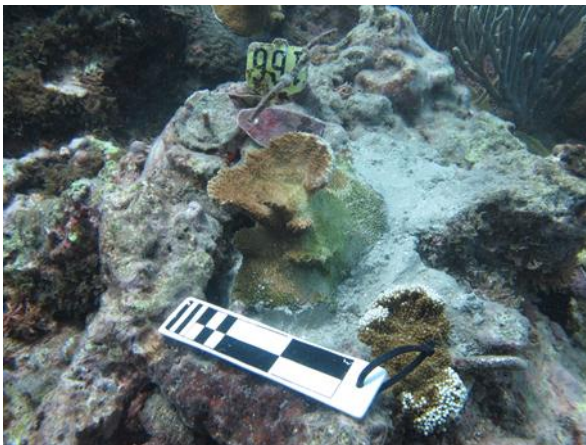


FIGURA 130. Reclutas sexuales sembrados en las áreas de restauración en Arrecife Cuevones. Colonia sembrada la etapa anterior (izq), colonia sembrada en esta etapa (der).

En el experimento de comparar la sobrevivencia y crecimiento de *Acropora palmata* inoculada con 6 diferentes tipos genéticos se realizó un primer monitoreo en Agosto y en septiembre, 10 días después en algunos tratamiento se habían asentado más larvas y en uno se perdieron reclutas (Tabla 36).

El análisis de los resultados del experimento nos demostró que ofreciendo un clado únicamente a reclutas recién asentados de *Acropora palmata* la incorporación de simbioses en los corales es muy baja por lo que es muy probable que *Acropora palmata*, en cautiverio requiera de varios clados para incorporación exitosa de los simbioses.

TABLA 36. Número de reclutas sexuales de *Acropora palmata* por clado de simbiote utilizado para la infección.

CLADO	Número de reclutas	
	22 agosto de 2013	6 de septiembre de 2013
454	146	246
456	17	20
459	70	66
460	46	88
462		
470	98	145

5. INDICADORES DE PROGRESO Y ANÁLISIS DE AVANCE

TABLA 37. Evaluación de los indicadores de avance para la 7ª etapa del proyecto.

	Actividad	Indicador de avance total	Ejecutado en el proyecto	Indicador avance del proyecto
1. MARCAJE	Marcaje permanente de áreas para restauración activa (Cuevones y Manchones)	Marcaje instalado (100%)	1 evento x sitio	100%
	Marcaje permanente de áreas para evaluación sucesional en Cuevones (a restaurar, sin restaurar y referencia)	Marcaje instalado (100%)	1 evento	100%
	Caracterizar áreas a restaurar y sitios de referencia	Caracterización realizada (100%)	2 eventos x sitio	100%
2. RESTAURACIÓN	Siembra inicial para restauración activa en 2 sitios a restaurar	1 evento de siembra x sitio (300 col x sitio)	1 evento x sitio	100%
	Siembras semestrales para restauración activa en 2 sitios	5 eventos de siembra x sitio (180 col x sitio)	5 evento x sitio	100%
	MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas.	12 registros trimestrales por sitio	9 registros x sitio (se solicitó modificación)	100%
	Registro fotográfico de áreas restauradas	7 registros por sitio (300 fotografías x sitio aprox.)	8 registros	100%
3. ACUARIOS	Instalación de sistemas de cultivo de corales exteriores	10 sistemas instalados	10 sistemas instalados	100%
	Acondicionamiento de sistemas de cultivo controlados	4 sistemas reparados	4 sistemas reparados	100%
	Rutinas para el mantenimiento de corales en cultivo	Rutina diaria de limpieza y mnto	Rutina x día	100%
	Colecta de fragmentos de coral del medio natural y aclimatación de ejemplares	8 Colectas*	8 colectas	100%
	Producción de nuevos fragmentos para abastecer el vivero (Acuarios)	8 Eventos de fragmentación*	8 eventos	100%
	Exportación de fragmentos de coral (de acuarios a sistemas de cultivo en mar)	8 Eventos traslocación de fragmentos*	8 eventos	100%
	MONITOREO trimestral (sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo acuarios)	16 registros trimestrales	16 registros	100%
4. SISTEMAS MARINOS	Instalación de sistemas de cultivo en el mar con capacidad para 1200 fragmentos	4 eventos para instalar SCM	4 eventos	100%
	Producción de nuevos fragmentos para abaster el vivero (sistemas marinos)	8 Eventos de fragmentación	8 evento	100%
	Exportación de fragmentos de coral (de SCM a los sitios de restauración)	5 Eventos de traslocación fragmentos	1 evento	100%

	MONITOREO trimestral para evaluar sobrevivencia y crecimiento de corales en cultivo (sistemas marinos)	16 registros trimestrales	16 eventos	100%
5. SUCESIÓN	MONITOREO bimestral de los componentes estructuradores	Bases de datos de reclutas de coral, macroalgas y erizos (20 registros)	2 registros	100%
	Instalación de sustrato para reclutamiento natural de corales	100 placas de reclutamiento colocadas por año (3 años)	80 placas (se justificó el cambio)	100%
	Retiro y análisis de placas de reclutamiento	Base de datos con especies reclutas, número por especie, diámetro y compendio fotográfico de una foto por recluta registrado (3 eventos)	1 Evento	100%
6. REP. SEXUAL	Eventos reproductivos para obtención de reclutas sexuales en laboratorio	4 Eventos de reproducción sexual	19 eventos	100%
	Entrega de reclutas sexuales a acuarios de INAPESCA y XCARET	4 Entregas	2 entrega	100%
	MONITOREO trimestral de sobrevivencia y desarrollo de reclutas sexuales	14 registros trimestrales	2 registros	100%
INFORMES	Entrega de informe de avances semestral con avance del programa de monitoreo	7 informes parciales	7 informes parciales	100%
	Entrega del Informe final y productos comprometidos	1 informe anual	1 informe final	100%

6. ANÁLISIS DE AVANCE DE TODO EL PROYECTO

En esta sección se describen de manera resumida los avances del proyecto desde sus inicios, a partir de un concentrado del stock de colonias producidas en el vivero, así como de un comparativo de los análisis comprometidos.

6.1. Vivero

Se muestra un resumen de la producción de colonias en los diferentes módulos del vivero de coral a lo largo de las etapas del proyecto.

6.1.1. Acuario (SCE)

Se muestra el registro de la producción de colonias en los sistemas de cultivo externo (SCE), y el stock de colonias en el vivero en las diferentes etapas del proyecto (Tabla 38).

TABLA 38. Histórico de producción de colonias de coral en los módulos del SCE del vivero de coral.

SISTEMA DE CULTIVO CONTROLADO Y EXTERIOR (SCC y SCE)	ETAPA							
	1 ^a .	2 ^a .	3 ^a .	4 ^a .	5 ^a .	6 ^a .	7 ^a .	8 ^a .
Colonias producidas en la etapa	800	163	566	209	144	422	105	149
Total de colonias producidas en el proyecto	800	963	1529	1738	1882	2304	2409	2558
Colonias transferidas al SCM	0	108	268	532	0	0	209	373
Colonias empleadas para restauración	0	0	0	0	44	24	0	0
Stock en vivero	800	345	566	209	127	317	200	250
Colonias muertas en la etapa	0	510	77	34	17	105	3	3

6.1.2. Sistema de Cultivo Marino (SCM)

Se muestra el registro de la producción de colonias en los sistemas de cultivo marino (SCM), y el stock de colonias en el vivero en las diferentes etapas del proyecto (Tabla 39).

TABLA 39. Histórico de producción de colonias de coral en el módulo del SCM del vivero de coral.

SISTEMA DE CULTIVO MARINO (SCM)	ETAPA							
	1 ^a .	2 ^a .	3 ^a .	4 ^a .	5 ^a .	6 ^a .	7 ^a .	8 ^a .
Colonias producidas en la etapa	803	600	664	340	314	629	500	700
Total de colonias producidas en el proyecto	803	1403	2067	2407	2721	3350	3850	4550
Colonias empleadas para restauración	0	0	360	414	335	360	374	-
Colonias transferidas del SCE								
Stock en vivero	797	1381	1326	869	532	706	707	700
Colonias muertas en la etapa	6	16	381	383	316	95	125	0

6.1.3. Reclutas sexuales

En esta etapa no existió producción de reclutas sexuales. En esta etapa se realizó la transferencia de 9 colonias de reclutamiento sexual producidas en el proyecto hacia el área de restauración en Arrecife Cuevones. En la Tabla 40 se muestra los datos de producción de reclutas de coral durante todo el proyecto.

TABLA 40. Histórico de producción de reclutas sexuales de coral en 3 módulos del vivero de coral (UNAM, INAPESCA y XCARET).

SISTEMA DE CULTIVO MARINO (SCM)	ETAPA							
	1ª.	2ª.	3ª.	4ª.	5ª.	6ª.	7ª.	8ª.
Colonias producidas en la etapa	2492	1565	0	>10,000	0	>10,000	0	
Total de colonias producidas en el proyecto	2492	4057	4057	-	-	-	-	
Colonias empleadas para restauración	0	0	0	-	20	-	9	
Stock en vivero	1137	341 + (1565)	115	64	39	-	0	
Colonias muertas en la etapa	1355	1014	3942	-	-	-	0	

6.2. Áreas a restaurar

Para evaluar el avance del proyecto en cuanto al impacto de las actividades de restauración activa se pretende hacer una comparación temporal, a partir de esquemas de distribución y abundancia por especie (mosaico) en las 2 áreas a restaurar por etapa.

Para cada área, el primer mosaico representa la condición inicial del sitio previo a las acciones de restauración activa, y el siguiente la condición actual al final de esta etapa (Figura 131 y 132).

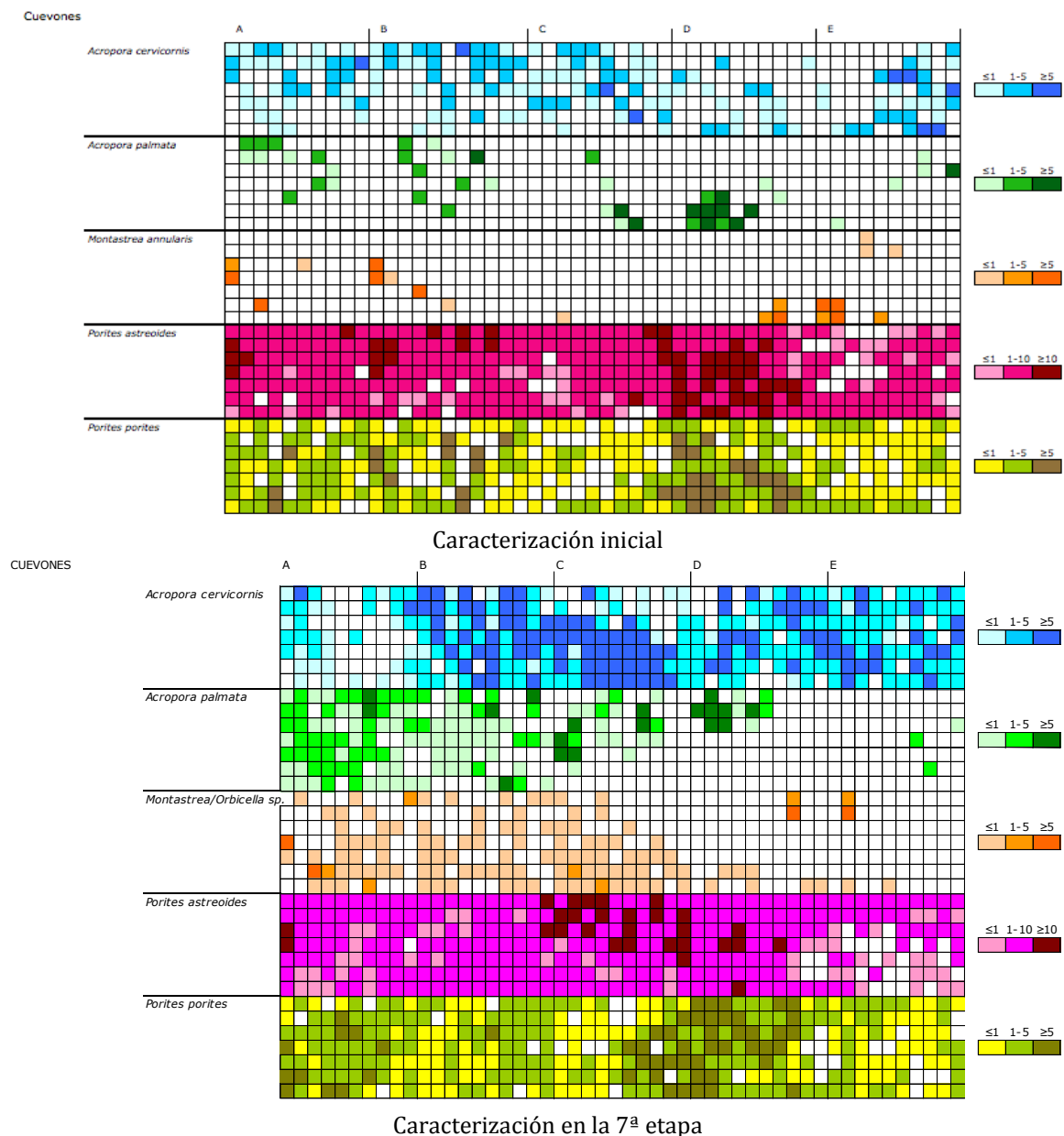


FIGURA 131. Esquema de la distribución y abundancia de las principales especies de corales en Arrecife Cuevones al inicio del proyecto de restauración activa (arriba) y después de la siembra realizada en la presente etapa (abajo). Cada especie se presenta con un color en diferentes tonos que indican el porcentaje de cobertura relativo por metro cuadrado del área de restauración.

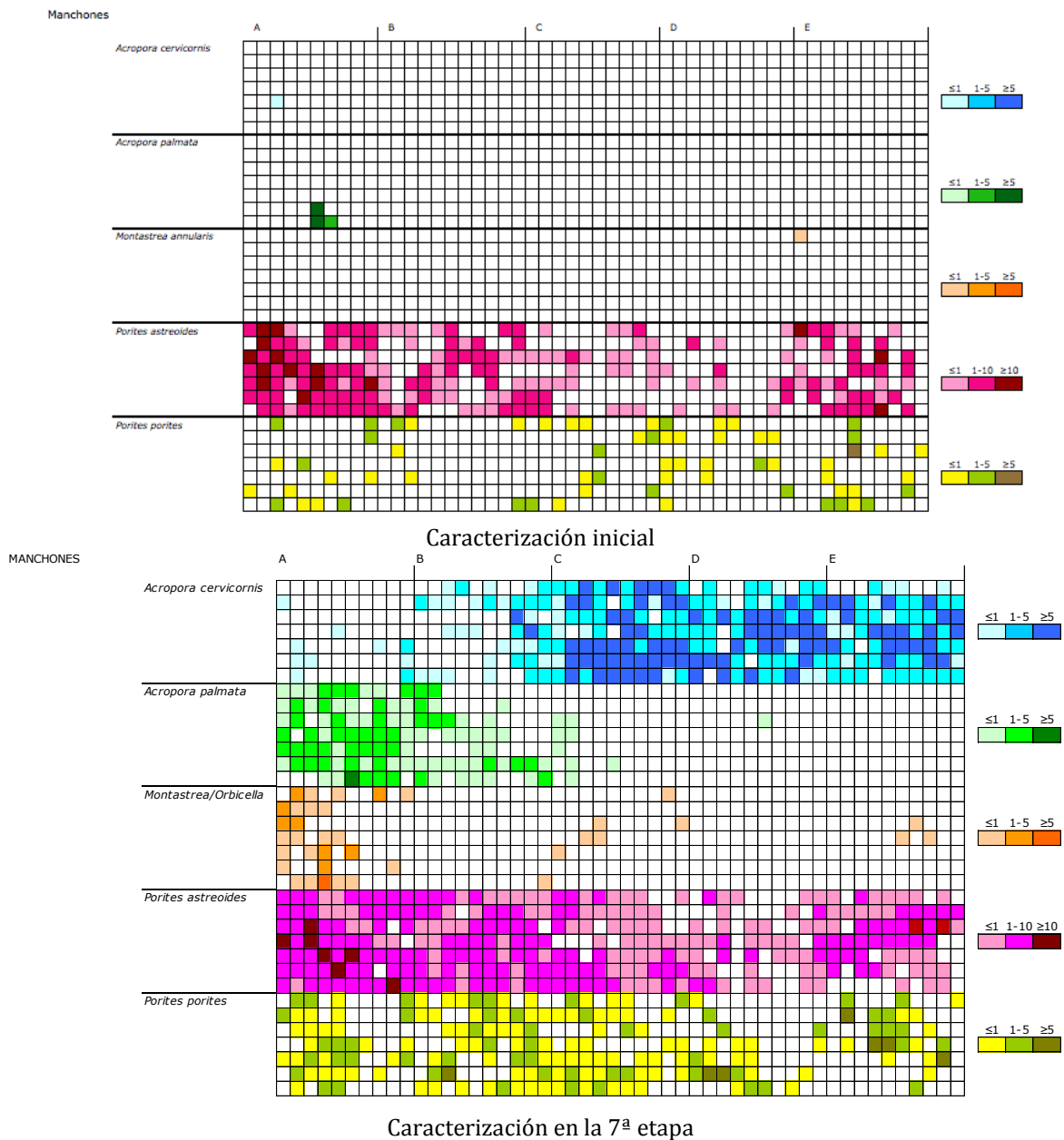


FIGURA 132. Esquema de la distribución y abundancia de las principales especies de corales en Arrecife Manchones al inicio del proyecto de restauración activa (arriba) y después de la siembra realizada en la presente etapa (abajo). Cada especie se presenta con un color en diferentes tonos que indican el porcentaje de cobertura relativo por metro cuadrado del área de restauración.

En las siguientes gráficas se muestra el incremento en cobertura por especie que se ha logrado en los sitios de restauración, estimados a partir del análisis del registro fotográfico semestral (Figura 133).

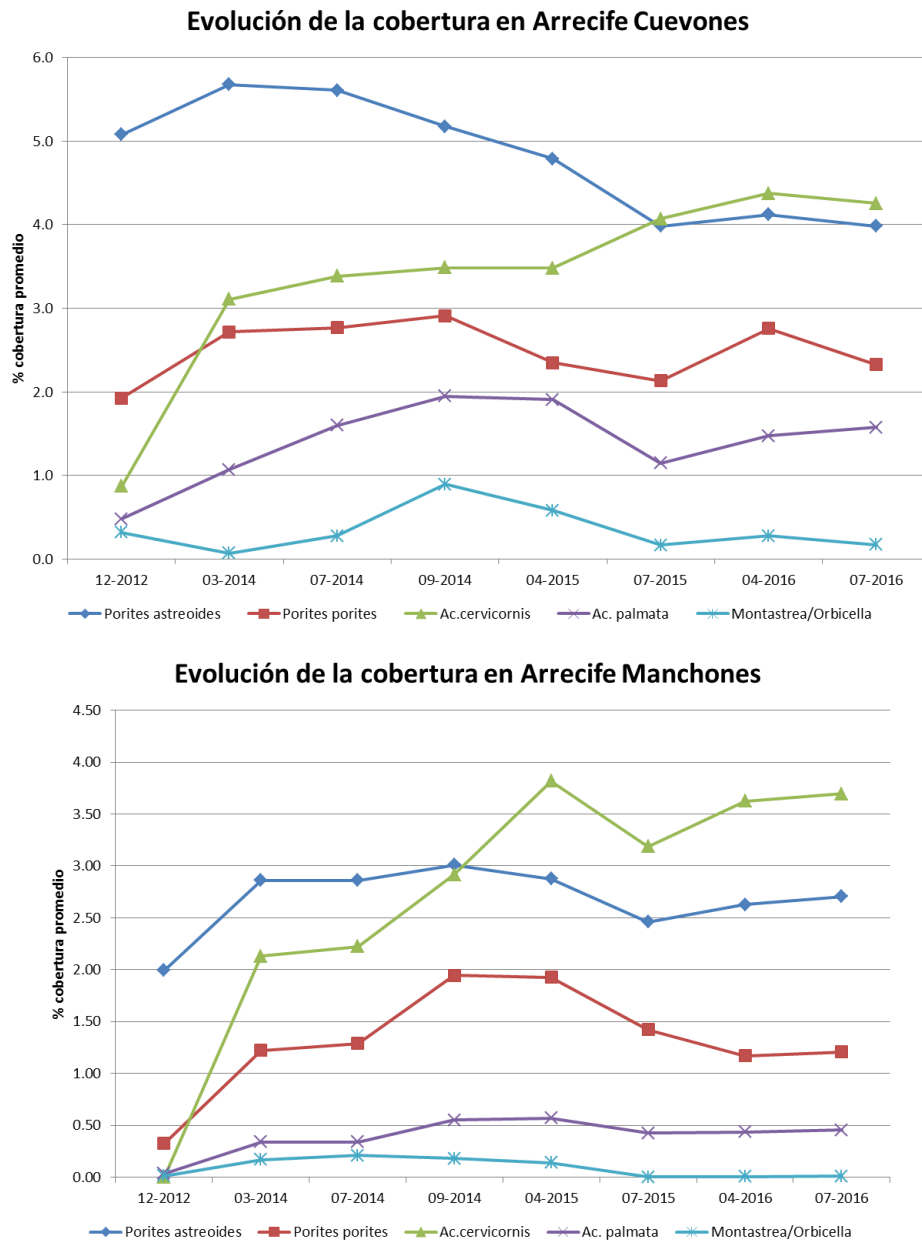


FIGURA 133. Seguimiento del incremento de la cobertura coralina en los sitios de restauración.

6.2.1. Supervivencia

Para estimar la supervivencia de las colonias que se han destinado para las actividades de restauración activa se presenta un balance de las colonias trasplantadas en las diferentes etapas del proyecto (Tablas 41 y 42).

TABLA 41. Balance de colonias destinadas para la restauración activa durante este proyecto en Arrecife Cuevones.

ARRECIFE CUEVONES	ETAPA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Colonias trasplantadas en la etapa	0	300	180	101	192	180	188	-
Total de colonias trasplantadas	0	300	480	581	773	953	1141	1141
*Total de Fragmentos vivos al final de la etapa	N/A	288	426	516	701	867	1046	900
% de supervivencia	N/A	96%	91%	98%	99%	98%	99%	86%

**NOTA: Número estimado a partir de la muestra del 30% que se encuentra marcada*

TABLA 42. Balance de colonias destinadas para la restauración activa durante este proyecto en Arrecife Manchones.

ARRECIFE MANCHONES	ETAPA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Colonias trasplantadas en la etapa	0	300	180	313	207	180	186	-
Total de colonias trasplantadas	0	300	480	793	1000	1180	1366	1366
Total de Fragmentos vivos al final de la etapa	N/A	273	435	740	937	1080	1212	970
% de supervivencia	N/A	91%	96%	99%	99%	96%	95%	80%

**NOTA: Número estimado a partir de la muestra del 30% que se encuentra marcada*

* Nota: Los valores del porcentaje de supervivencia que se han utilizado para hacer esta tabla del balance de las colonias sembradas en los sitios de restauración se estimaron a partir del porcentaje de mortalidad reportado en los registros del monitoreo para evaluar supervivencia y crecimiento de colonias de coral fijadas (sección 4.2.3.). Sin embargo, en cada registro se reporta un cierto porcentaje de marcas que no son encontradas, cuya causa puede ser la pérdida/deterioro de la marca, o daño/muerte/desprendimiento de la colonia, por lo que este porcentaje de supervivencia está sobreestimado.

Para el informe final se hará un análisis de la tasa de supervivencia considerando este factor, y se discutirá al respecto.

6.2.2. Crecimiento

Se presenta una gráfica de la comparación de altura de las colonias sembradas en los sitios de restauración a lo largo de los registros del programa de monitoreo en la sección 4.2.3.

6.3. Propuesta de restauración sucesional

6.3.1. Introducción

a) La restauración ecológica en los arrecifes de coral

El uso indiscriminado de los recursos naturales por parte de las poblaciones humanas ha provocado que los ecosistemas se encuentren gravemente deteriorados (Guzmán, 1991; Noble & Dirzo, 1997; Ostrander *et al.*, 2000; Epstein *et al.*, 2001; Epstein *et al.*, 2003; Briggs, 2009), y los arrecifes de coral son particularmente vulnerables a dicho uso. Ante las alarmantes tasas de degradación de los arrecifes de coral y en la búsqueda para reducir los efectos negativos directos e indirectos del uso de éstos, la restauración ha sido una de las herramientas que mayor atención ha obtenido en las últimas décadas por los manejadores de las áreas naturales protegidas y su puesta en práctica parece una necesidad cada vez más urgente.

La restauración ecológica es la actividad que se centra en el inicio o aceleración de los procesos de recuperación de la estructura y función de las comunidades afectadas por disturbios humanos (Young *et al.*, 2005). En este proceso deben considerarse la remoción o reducción de la fuente del disturbio y la reconsideración de las actividades que ocasionaron el daño (Sánchez, 2005). La restauración ecológica significa modificar la dinámica recién adquirida de los sistemas blanco (Parker, 1997). Esta intervención se sustenta en el hecho de que el disturbio ha modificado la trayectoria en la que los componentes comunitarios interactuaban (Sánchez, 2005). Entender los procesos sucesionales que ocurren en una comunidad después de que es afectada por un disturbio es un factor que es relevante y que le da mayor solidez a los esfuerzos de restauración ya que aunque el sitio parezca estar en un estado de degradación permanente, se puede encontrar una secuencia de cambios sucesionales que se dirijan hacia un estado deseado (Cargill y Chapin, 1987; Young *et al.*, 2005).

Ante el escenario de degradación global que enfrentan los arrecifes, la restauración natural es descartada ya que ésta ocurriría en el orden de siglos, resultado de las tasas bajas de crecimiento de los corales y que el proceso de reclutamiento natural no es suficiente para poder contrarrestar los efectos de la degradación (Precht *et al.*, 2000; Miller y Barimo., 2001; Ferse *et al.* 2013). Por lo tanto, las estrategias de restauración en estos sistemas se centran en la restauración activa, principalmente en la fijación de fragmentos. De acuerdo con Zimmer (2006), en el corto plazo, la introducción de fragmentos permite evitar la mortalidad alta que ocurre en las etapas tempranas del desarrollo de los corales; permite librar las restricciones impuestas por el lento crecimiento de los corales, favorece el incremento instantáneo de la cobertura de coral y de la complejidad topográfica. En el mediano plazo, los fragmentos pueden convertirse en fuentes de material para la reproducción, ya sea por la liberación de gametos o por fragmentación, mientras que el incremento de la complejidad topográfica favorece el

incremento de hábitats disponibles como sitios de refugio para otras especies arrecifales. En el largo plazo, se recuperarían la capacidad de ser una fuente de material reproductivo para otros sitios al aumentar la densidad de las colonias sexualmente reproductivas (Acevedo, 2016).

Optar por restaurar un sistema requiere considerar el mayor número de limitantes potenciales de manera que se puedan considerar en el diseño de la estrategia de restauración. Por ejemplo, los costos asociados a la producción de los fragmentos y de la logística propia de transporte y fijación. La colección de los fragmentos implica no comprometer la integridad de las colonias donadoras. Además, las colonias donadoras deben provenir de sitios cuyo estado de conservación no se encuentre comprometido. En el caso de la recolección de fragmentos ya existentes, los que se colecten tendrán que encontrarse en buenas condiciones. Otro de los problema a enfrentar es la existencia de disturbios que operen a escalas mayores que la restauración o diferentes al imputado como causante del estado de degradación. En este caso la situación es de mayor riesgo, considerando que las actividades que comprometen la integridad de los sistemas arrecifales han aumentado constantemente, desde las actividades turísticas sin las medidas adecuadas hasta modificaciones a gran escala de las condiciones ambientales del mar.

En términos generales, el uso de los fragmentos se ha sugerido cuando: 1) en el sitio ha ocurrido un cambio de fase dominado por otros grupos (principalmente algas), 2) el reclutamiento natural es improbable; 3) donde exista suficiente material donador (i.e., suficientes colonias o sitios); y 4) donde las condiciones ambientales no limiten el desarrollo de los fragmentos introducidos (Rinkevich, 2005). Además del papel de construcción arrecifal, la continuidad de las interacciones entre los herbívoros, las algas y los corales son fundamentales para que estas comunidades puedan persistir. Sin embargo, éstas interacciones son consideradas con menor frecuencia en el diseño de las estrategias de restauración y como indicadores de éxito. El incremento en la cobertura de tejido vivo y la complejidad estructural a escala de decenas de centímetros y la supervivencia y crecimiento de los fragmentos introducidos son las variables frecuentemente usadas para medir el éxito de la restauración. Sin embargo, la sobrevivencia y crecimiento de fragmentos no brindan información sobre el efecto esperado como promotores del establecimiento de las larvas y su posterior reclutamiento, y tampoco sobre la capacidad de la comunidad de continuar los procesos de recuperación favorables. Una perspectiva que considera como parte de la restauración las interacciones entre los componentes de la comunidad es la restauración sucesional. En esta, el conocimiento de los procesos clave para la estructuración de una comunidad son parte fundamental de las acciones de restauración. De esta manera, se busca recuperar los procesos locales que permiten la continuidad de los arrecifes, como el control de la herbivoría para liberar espacio ocupado por macroalgas, reduciendo la competencia entre macroalgas y corales, facilitando el establecimiento y reclutamiento de corales.

b) Evidencia de deterioro previo al disturbio

De acuerdo con reportes de Reefkeeper International (1997, 1999a, 1999b) antes del encallamiento la comunidad de corales se encontraba dominada por *Acropora palmata*, *Millepora complanata* y *Porites astreoides*. Sin embargo, la cobertura de coral osciló entre 22 y 36%; mientras que la cobertura de algas varió entre 39 y 66% (Figura 134). Esto significa que la comunidad del arrecife ya se encontraba en un proceso de reemplazo de los corales pétreos con mayor importancia en la construcción arrecifal por otros grupos,

principalmente las macroalgas carnosas y corales de crecimiento submasivo, con estrategia de reproducción por incubación y reclutamiento local (Victoria-Salazar et al. en revisión).

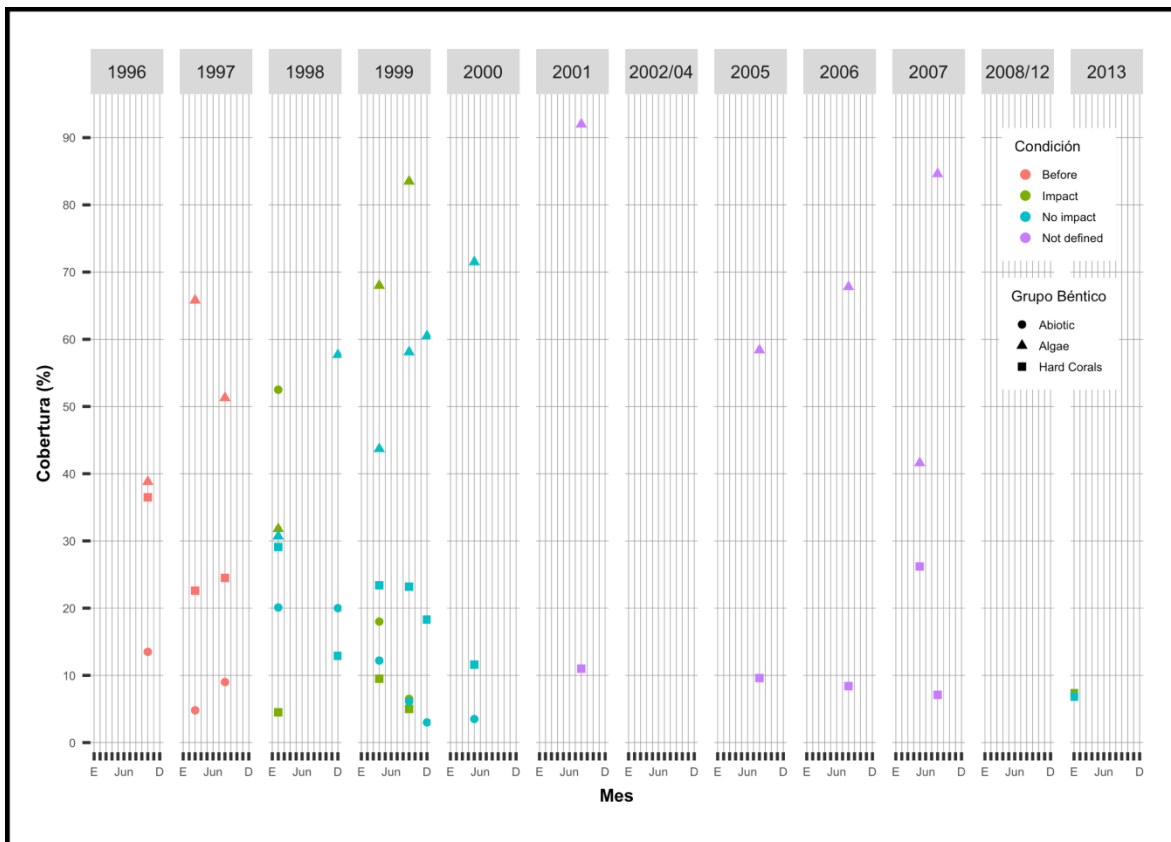


FIGURA 134. Cambios temporales de cobertura de corales pétreos, algas y sustrato desnudo antes y después del encallamiento.

c) El encallamiento

En diciembre de 1997 el crucero *Leeward* causó un encallamiento de tipo deslizamiento sobre el parche arrecifal Cuevones, afectando un área de 480 m², lo cual representa el 10% de su área. De acuerdo con los reportes internos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), entre las especies afectadas destacaron las de los géneros *Acropora* y *Orbicella*. El papel del encallamiento fue el de agente catalizador del proceso de recambio de especies. Después del incidente, las especies de coral con estrategias de vida oportunista (e. g. *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites*) recolonizaron el sitio junto con las algas carnosas. Durante la ejecución de este proyecto uno de los resultados fue que tanto las algas carnosas como *P. Astreoides* ocupan una porción importante del arrecife. Hasta el momento, la dinámica de los procesos que controlan la estructura de este arrecife, sigue siendo una que favorece un estado alternativo. Mientras que los grupos clave que permitirían el restablecimiento de la comunidad se encuentran virtualmente ausentes (Ver resultados en el informe final).

d) Diagnóstico de la condición actual

Durante el desarrollo de este proyecto se estudiaron cómo ocurren las asociaciones entre los principales grupos estructuradores de la comunidad, y cómo éstas modifican el proceso sucesional de los diferentes sectores considerados (referencia, impacto sin restauración e impacto con restauración). En un esfuerzo que consideró múltiples escalas, se encontró que la estructura de la comunidad no es diferente entre los sectores comparados. *Porites astreoides* es la especie con mayor contribución en los tres sectores en términos de la abundancia de colonias adultas, la cobertura estimada de tejido vivo y el número de reclutas. En el caso del sector sujeto a restauración se notó que esta dominancia se está diluyendo a medida que un mayor número de fragmentos se introdujeron a la comunidad. Sin embargo, la cobertura y la densidad absoluta se mantuvieron, y no se detectó un efecto positivo en el número y composición de reclutas de coral. En cuanto a *Acropora*, uno de los problemas más graves que se detectó fue la virtual ausencia de sus reclutas. Estos se encontraron en densidades muy cercanas a cero (Figura 108) y los individuos registrados permanecieron poco tiempo en el arrecife (Figura 109 y 110). En los arrecifes de coral ha sido ampliamente demostrada la importancia del sustrato adecuado (e. g., algas costrosas calcáreas) para el establecimiento de los reclutas (Doropolus *et al.*, 2016). Durante el periodo evaluado tampoco se encontraron diferencias en la cobertura entre los tres sectores de cada uno de los cinco grupos algales medidos. La cobertura de las algas costrosas calcáreas osciló entre el 10 y el 30 % de la superficie arrecifal. Mientras que las macroalgas carnosas acapararon entre el 15 y 60 % de la superficie arrecifal.

En cuanto a la densidad de erizos, ésta fue mayor en el sector de referencia. Las densidades entre el sitio de impacto sin restauración y el sitio de impacto con restauración no variaron en el tiempo. El análisis de la densidad en una escala temporal fina (bimestral), reveló que el sitio de impacto sin restauración, además de registrar las menores densidades, la presencia del erizo no fue constante en todos los muestreos (Figura 104). En el mejor de los casos, la densidad promedio de los erizos *Diadema antillarum* apenas fue de 2 ind. m⁻² (e. g., en el sector de referencia) (Figura 104 y 105). Esto contribuyó en que el erizo no fuera factor controlador de la cobertura de macroalgas carnosas. En el caso de los grupos algales estudiados, no se encontraron diferencias entre las diferentes condiciones evaluadas (i.e., referencia, impacto con restauración e impacto sin restauración) (Figura 106). El grupo dominante durante todo el periodo de evaluación (2013-2015) fue el de las macroalgas carnosas, incluyendo el sector bajo el esquema de restauración activa (Figura 106).

De los corales pétreos, *Porites astreoides* fue la especie ampliamente dominante en todas las variables evaluadas (e. g., abundancia, cobertura de tejido vivo, número de reclutas, supervivencia de reclutas) entre los tres sectores. En cuanto a la distribución de los reclutas, destaca que el proceso de reclutamiento de las especies de corales importantes en la formación de los arrecifes es prácticamente nulo (Figura 108), aunque el sitio se ha mantenido bajo un esquema de protección de no tocar. La mayoría de los individuos registrados fueron del género *Porites*. En contraste, las especies de los géneros *Acropora* y *Orbicella* se registraron con menores frecuencias y sus densidades fueron muy cercanos a cero (Figura 108). Aunado a esto, los pocos individuos que se registraron permanecieron muy poco en el arrecife (Figura 109 a 112), sin importar su papel en la construcción arrecifal.

6.3.2. Efecto de la introducción de fragmentos en una porción del área afectada

Quince años después del encallamiento se desarrolló el proyecto “Programa interdisciplinario para compensar daños antropogénicos en arrecifes coralinos del Caribe mexicano” y uno de sus objetivos consideró la introducción de fragmentos de coral de varias especies y de diferentes orígenes (i.e., sexual y asexual) como medida para detener y revertir el efecto del encallamiento. Para la fijación de los fragmentos, el área afectada por el encallamiento se dividió en dos porciones y sólo en una se fijaron los fragmentos, mientras que la otra sirvió como testigo para evaluar los cambios en la asociación entre los grupos clave para el funcionamiento arrecifal. Adicionalmente, se contó con un sector no afectado por el encallamiento como referencia de la trayectoria del proceso de sucesión.

En términos de los cambios esperados en el corto plazo, la introducción de los fragmentos permitió alcanzarlos. La abundancia relativa de las especies clave, así como la cobertura relativa de tejido vivo incrementaron. La supervivencia de los fragmentos también fue favorable, casi del 100% (Sección 6.2 del informe final). En cuanto a la complejidad topográfica, el aumento inmediato estuvo relacionado con el tamaño del fragmento o colonia introducida. Es importante señalar que aun con la introducción de fragmentos, *P. astreoides* permaneció como una de las especies con las coberturas más altas, a la par de la proporcionada por los fragmentos introducidos de *Acropora*. Respecto a las algas, encontramos que independientemente del sector evaluado las macroalgas carnosas siguen dominando el fondo arrecifal. En este sentido, la introducción de fragmentos se supone ayudaría a reducir el área ocupada por este grupo y ayudaría a incrementar la cobertura de las algas costosas calcáreas. Otro de los efectos esperados de la introducción de fragmentos es la modificación de las condiciones cercanas a este, incrementando las oportunidades para el establecimiento de nuevos reclutas. Sin embargo, la dinámica de los reclutas dentro del área sujeta a la introducción de los fragmentos no mostró un efecto positivo distinguible con respecto a la porción no afectada o la afectada sin introducción de fragmentos de coral (Figura 102). Las especies que dominaron la comunidad de reclutas pertenecen al género *Porites*, especialmente los de *Porites astreoides*, siendo la porción sujeta a restauración la que registró las mayores densidades. En cuanto a las especies clave en la construcción del arrecife, presentaron la menor abundancia en los tres sectores, y en el seguimiento de la supervivencia de los reclutas su tasa de mortalidad es casi del 100%. En este sentido, el papel esperado de la restauración activa como promotor del reclutamiento de coral parece no estar actuando a la escala espacial y temporal observada. Independientemente del sector, *Porites* mantiene una densidad de reclutas parecida. En el caso de las especies clave, podría suceder que el proceso determinante en el éxito del reclutamiento opera en los procesos previos al establecimiento de la larva; por ejemplo, densidad suficiente de colonias madre, suficiente provisión de propágulos, condiciones ambientales no favorables para la fecundación y el desarrollo larvario, condiciones ambientales no favorables para el asentamiento. Acevedo (2016) determinó mediante modelos que aunque las colonias de *Acropora* tengan el potencial de producir y liberar suficientes gametos, la densidad de colonias es la que tiene la mayor importancia en el éxito de la fecundación. La densa dependencia del éxito de la reproducción podría ser la explicación a las bajas densidades de reclutas en Cuevones, ya que las densidades de colonias de estas especies fue también baja (Tabla 25).

6.3.3. Acciones recomendadas

La comunidad arrecifal del parche ha mantenido la dinámica que ha favorecido su degradación desde antes del encallamiento. La evidencia encontrada sugiere que, aunque los fragmentos han logrado una alta supervivencia, su introducción no es suficiente para permitir a la comunidad adquirir la dinámica que le permita alcanzar un estado parecido al perdido. Adicionalmente, los esfuerzos de restauración deben ser capaces de reducir los efectos de los disturbios que han favorecido el proceso de degradación generalizada del arrecife, y que actúan a una escala mayor a la del parche.

Para trasladar el éxito de la introducción de fragmentos a los aspectos funcionales de la comunidad, las acciones de restauración deben considerar la evidencia recolectada durante la ejecución del proyecto para diseñar e implementar una estrategia de restauración sucesional que constaría de tres perspectivas o enfoques.

1. Optimizar la estrategia inicial de introducción de fragmentos de origen asexual y sexual a través de las siguientes acciones.
 - Reducir la competencia entre fragmentos introducidos y macroalgas a escalas de decenas de centímetros. Esto se lograría seleccionando *a priori* áreas del arrecife con la menor densidad de macroalgas y la mayor disponibilidad de sustrato favorable.
 - Aumentar la densidad de fragmentos en áreas con sustrato favorable. Esto se espera que genere un aumento de densidad a una escala de metro cuadrado y un aumento instantáneo en la complejidad estructural. La sobrevivencia y crecimiento en el corto plazo a mediano plazo puede conducir a la fusión de fragmentos con un subsecuente aumento del potencial de crecimiento tridimensional y desencadenar efectos positivos puntuales como favorecer el reclutamiento a esa escala espacial.
2. Manipulación experimental del erizo *Diadema antillarum* para control de la cobertura de macroalgas.
 - Reducir la cobertura de las macroalgas carnosas a través del incremento del efecto regulador que la herbivoría produce. Esto es, se debe explorar el papel de incrementar la densidad de erizos en el arrecife hasta encontrar una en la que el efecto neto sobre las algas sea negativo pero que a la vez no propicie un incremento en la mortalidad de los reclutas. Podría iniciarse con densidades de 3 a 4 ind m⁻².
3. Monitoreo de indicadores de éxito de la restauración sucesional

Además de la supervivencia y crecimiento, las medidas de éxito de la restauración deben considerarse la dinámica de la comunidad arrecifal. Para esto es necesario establecer un monitoreo del sistema restaurado en el que se evalúe lo siguiente:

- Competencia entre corales y algas. Tomando en consideración que las tallas de las colonias de coral son un factor relevante en la competencia, se espera que los conglomerados de fragmentos sean competitivamente superiores a los fragmentos aislados. La fusión de fragmentos conduciría a colonias de mayor talla y como resultado menor posibilidad de ser sobrecrecidos por las macroalgas.
- Reclutamiento coralino en el entorno inmediato a los conglomerados de fragmentos. Se espera que los conglomerados de fragmentos actúen como atractores para el asentamiento de larvas de coral. Es necesario evaluar los cambios en las densidades de reclutas, su identidad y probabilidad de supervivencia. Considerando esto, una restauración exitosa sería aquella en la

que la densidad de reclutas de las especies claves incrementa conforme avanza el programa de restauración.

- Cambios en la cobertura de macroalgas como respuesta a la manipulación de la densidad de erizos. La manipulación de la densidad de erizos tendría que mostrar que se reduce la cobertura de algas carnosas, aumenta el sustrato disponible para el asentamiento de larvas sin comprometer la supervivencia de reclutas por el efecto de herbivoría.

6.3.4. Consideraciones finales

Las acciones propuestas para considerar el proceso sucesional en las acciones de restauración activa ofrecen un punto de partida para mejorar los resultados de estos esfuerzos. Sin embargo, también es necesario reconocer las limitaciones de estas acciones. El proceso sucesional que una comunidad sigue está estrechamente ligado con el contexto ambiental en el que se desarrolla. Las propuestas aquí vertidas permitirán tomar decisiones sobre la manipulación de dicho proceso, pero sólo serán efectivas si las condiciones y procesos que actúan de manera regional o global son acordes con el funcionamiento deseado de la comunidad.

6.3.5. Literatura citada

- Acevedo Rosas A. 2017. Efecto de la calidad del hábitat en el éxito de reclutamiento, supervivencia de reclutas y juveniles de coral en parches arrecifales constituidos por *Acropora palmata*. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría.
- Briggs JC. 2009. Atlantic coral reefs: the transplantation alternative. *Biological Invasions* **11**:1845-1854.
- Cargill S y Chapin F. 1987. Application of successional theory to tundra restoration: a review. *Arctic and Alpine Research* **19**:366-372.
- Doropoulos C, Roff G, Bozec YM, Zupan M, Werninghausen J y Mumby PJ. 2016. Characterizing the ecological trade-offs throughout the early ontogeny of coral recruitment. *Ecological Monographs* **86**:20-44.
- Epstein N, Bak RPM y Rinkevich B. 2001. Strategies for gardening denuded coral reef areas: the applicability of using different types of coral material for reef restoration. *Restoration Ecology* **9**:432-442.
- Epstein N, Bak RPM y Rinkevich B. 2003. Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **13**:387-395.
- Ferse SCA, Nugues MM, Romatzki SBC y Kunzmann A. 2013. Examining the Use of Mass Transplantation of Brooding and Spawning Corals to Support Natural Coral Recruitment in Sulawesi/Indonesia. *Restoration Ecology* **21**:745-754.
- Guzmán H. 1991. Restoration of Coral Reefs in Pacific Costa Rica. *Conservation Biology* **5**:189-195.
- Miller M y Barimo J. 2001. Assessment of juvenile coral populations at two reef restoration sites in the Florida Keys National Marine Sanctuary: Indicators of success? *Bulletin of Marine Science* **69**:395-405.
- Noble I y Dirzo R. 1997. Forests as human-dominated ecosystems. *Science* **277**:522-525.

- Ostrander G, Armstrong K, Knobbe E, Gerace D y Scully E. 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.
- Parker V. 1997. The scale of successional models and restoration objectives. *Restoration Ecology* **5**:301-306.
- Precht W, Deis D, Gelber A, Moosa M, Soemodihardjo S, Soegiarto A, Romimohtarto K, Nontji A y Suharsono S. 2000. Damage assessment protocol and restoration of coral reefs injured by vessel groundings. *Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali* **2**:49-57.
- Reefkeeper International (1997) Cancún reef sites dominated by algae Cancun Reef Monitor Update. ReefKeeper International, Miami, Florida
- Reefkeeper International (1999a) Coral reef monitoring: Quarterly data report, Miami, Florida
- Reefkeeper International (1999b) Algae overtakes hard coral on the reefs of Cancún Cancun Reef Monitor Update. ReefKeeper International, Miami, Florida
- Rinkevich B. 2005. Conservation of coral reefs through active restoration measures: Recent approaches and last decade progress. *Environmental Science and Technology* **39**:4333-4342.
- 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.
- Young T, Petersen D y Clary J. 2005. The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms. *Ecology Letters* **8**:662-673.
- Zimmer B. 2006. Coral reef restoration: An overview. En: Precht WF (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*. Taylor & F

6.4. Análisis descriptivo sobre los procesos de colonización en los tres tipos de sitio (con restauración activa, sin restauración y referencia)

El análisis descriptivo y comparativo de los procesos de colonización en los 3 sitios que se analizaron: con restauración activa, sin restauración y de referencia, se muestra en la sección 4.5. Sucesión. Ahí se presenta una evaluación del proceso sucesional con respecto a la complejidad física, estructura de la comunidad coralina, reclutamiento coralino y cobertura de algas. Y se muestra la comparación entre los sectores de impacto sin restauración, impacto con restauración y referencia, con base en la riqueza específica, corales adultos, reclutamiento, densidad de erizos y cobertura algal.

6.5. Cálculo de los costos de la restauración

En esta sección se presenta una estimación de los costos de restauración de áreas arrecifales dañadas por encallamiento. En cuanto a este tema, el grupo de trabajo que colaboró en este estudio consideró que no era apropiado hacer estimaciones de los costos de restauración tomando como únicos elementos el monto solicitado como financiamiento a la CONABIO para el proyecto y la superficie de las áreas restauradas; sobre todo porque el proyecto tuvo un componente fuerte de investigación que se abordó durante los 4 años del proyecto, y porque ciertos rubros de gastos fueron cubiertos por las diferentes instituciones.

Bajo esta perspectiva, al término del proyecto se hizo un ejercicio para evaluar los costos de producción de las colonias, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual, incluyendo todas las actividades para el manejo y mantenimiento de los viveros de coral, las propias acciones de restauración y las actividades de monitoreo que son necesarias llevar a cabo, considerando las capacidades de trabajo adquiridas por el grupo de trabajo al término del proyecto. Por cuestiones prácticas se presentan por separado los costos de restauración mediante propagación clonal y los de reproducción sexual.

6.5.1. Costos de restauración mediante propagación clonal

En esta sección se presenta una estimación de los costos de restauración mediante propagación clonal, para lo cual se generó un documento en excell (Anexo 6.5.1. Estimación de costos restauración.xlsx), bajo una serie de supuestos y consideraciones:

Este ejercicio considera las actividades principales que se llevaron a cabo en el proyecto a lo largo de 4 años, las cuales incluyen:

- La construcción e instalación de un vivero marino de 60 planchas de concreto, con capacidad para 30 colonias cada una, y un total de 1,800 colonias.
- La producción de 980 colonias de coral por año, con un total de 3,920 colonias en 4 años.
- Un programa de Monitoreo del vivero marino, incluyendo actividades de limpieza de las estructuras y el manejo de las colonias dentro del vivero, considerando 4 días de trabajo de campo al mes.
- Producción de 750 colonias de coral por año en sistemas de acuario, incluyendo actividades de colecta y con un total de 3,000 colonias en los 4 años.

- Un programa de mantenimiento de cultivo de corales en acuario, incluyendo el monitoreo y limpieza de los acuarios, la reparación y adecuación de los sistemas de soporte de vida.
- Eventos de siembra de fragmentos de coral, considerando una siembra de 1,200 colonias por año, con un total de 3,600 colonias en 3 años.
- Monitoreo de las áreas de restauración, considerando 2 sitios por semestre.
- Las diferentes actividades contemplan el pago de honorarios de las personas que se requerirían; aunque durante la ejecución de este estudio esos gastos fueron cubiertos por las respectivas instituciones que participaron.

Este ejercicio no considera:

- El costo de las embarcaciones para el trabajo de campo en mar, ni los costos del mantenimiento y reparación de las mismas. Ese gasto fue solventado por el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN/CONANP).
- El costo de los equipos de buceo autónomo (SCUBA) que fueron necesarios para el trabajo de campo en mar (chaleco, regulador, neopreno, visor, aletas y lastre). Al inicio del proyecto se contó con equipo de la CONANP y del INAPESCA, y posteriormente se realizó una compra de equipo para la CONANP, pero no se considera en este ejercicio.
- El costo de materiales para la siembra de corales, mantenimiento del vivero y los monitoreos de las áreas restauradas como son tubería de PVC, cuerdas, marcas, cemento, bolsas, herramientas de corte, cepillos, etc. Estos materiales son variables para cada actividad.
- El costo de la infraestructura de los acuarios, incluyendo los sistemas de abasto de agua, filtración y bombeo; así como los costos de operación de los mismos (gastos de luz, agua, etc), ni los costos de producir el alimento vivo para la alimentación de los corales.

Resumen de la estimación de costos:

Bajo los criterios y consideraciones enunciadas anteriormente, se estimó un costo total de \$3,541,152 pesos M. N. para las acciones de restauración contempladas en 7 componentes durante 4 años, de acuerdo a la siguiente información:

El proyecto está conformado por 7 componentes:		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Total
Componente						
1	Instalación del vivero marino	\$ 172,440.00				\$ 172,440.00
2	Producción colonias para el vivero marino	\$ 57,672.00	\$ 57,672.00	\$ 57,672.00	\$ 57,672.00	\$ 230,688.00
3	Monitoreo y limpieza de vivero		\$ 283,104.00	\$ 283,104.00	\$ 283,104.00	\$ 849,312.00
4	Producción de colonias en Acuario	\$ 42,096.00	\$ 42,096.00	\$ 42,096.00	\$ 42,096.00	\$ 168,384.00
5	Mantenimiento y monitoreo de colonias en Acuario	\$ 225,600.00	\$ 225,600.00	\$ 225,600.00	\$ 225,600.00	\$ 902,400.00
6	Siembra de fragmentos / año		\$ 362,384.00	\$ 362,384.00	\$ 362,384.00	\$1,087,152.00
7	Monitoreo de área de restauración		\$ 43,592.00	\$ 43,592.00	\$ 43,592.00	\$ 130,776.00
		\$ 497,808.00	\$1,014,448.00	\$1,014,448.00	\$1,014,448.00	\$3,541,152.00

	VIVERO EN MAR: Instalación, Producción de colonias y Monitoreo	ACUARIOS: Producción de colonias y Monitoreo	RESTAURACIÓN: Siembra de colonias y Monitoreo		
COSTO DE PRODUCCIÓN Y MANATENIMIENTO DE COLONIAS EN VIVERO MARINO	X			\$ 1,252,440.00	3920 colonias producidas en vivero marino
COSTO DE PRODUCCIÓN Y MANATENIMIENTO DE COLONIAS EN VIVERO MARINO Y ACUARIO	X	X		\$ 2,323,224.00	6920 colonias producidas en vivero marino y acuario
COSTO DE PRODUCCIÓN Y SIEMBRA DE CORALES SOLO CON VIVERO MARINO	X		X	\$ 2,470,368.00	3600 colonias sembradas solo con vivero marino
COSTO DE PRODUCCIÓN Y SIEMBRA DE CORALES SOLO CON VIVERO MARINO Y ACUARIO	X	X	X	\$ 3,541,152.00	3600 colonias sembradas con vivero marino y acuario

	Pesos	USD	Colonias			Dólar	22.25
			producidas	sembradas			
Costo por fragmento PRODUCIDO EN VIVERO MARINO	\$ 319.50	\$ 14.36	3920	0			
Costo por fragmento PRODUCIDO EN VIVERO MARINO Y ACUARIO	\$ 335.73	\$ 15.09	6920	0			
Costo por fragmento SEMBRADO solo con VIVERO MARINO	\$ 686.21	\$ 30.84	3920	3600	91.84%	de las colonias producidas son sembradas	
Costo de fragmento SEMBRADO con VIVERO MARINO Y ACUARIOS	\$ 983.65	\$ 44.21	6920	3600	52.02%	de las colonias producidas son sembradas	

Se estima que el costo de producción de un fragmento de coral es de \$319.50 pesos, con base en una producción de 3,920 colonias producidas únicamente en vivero marino. Si se considera una producción mixta, tanto en vivero marino como en acuario, se tiene un costo de \$335.73 pesos por fragmento para un stock de 6,920 colonias.

Ahora bien, el costo de una colonia de coral ya sembrada en las áreas de restauración se estimó en \$686.21 pesos, considerando una siembra de 3,600 colonias que provienen de un lote de 3,920 colonias producidas en vivero marino; lo que implica que el 92% de las colonias producidas son sembradas. Si se considera una siembra del mismo número de colonias, pero que provienen de un lote de 6,920 colonias producidas tanto en vivero marino como en acuario, el costo del fragmento sembrado se estimó en \$983.65 pesos, con la diferencia de que solamente se estaría utilizando el 52% de las colonias producidas para siembra, dejando un stock remanente para reforzar la restauración en la misma área o para extender el área.

Desglose de gastos (en pesos M.N.) considerados por etapa:

ETAPA 1		INSTALACIÓN DEL VIVERO MARINO				
Construcción de planchas de concreto para el vivero			Costo Etapa 1	\$ 172,440.00		
Llevar y colocar las planchas						
Colocación de planchas para el vivero de corales						
Esta etapa considera la construcción de:		60	planchas			
COSTOS						
Construcción planchas de concreto		Piezas	precio	subtotal		costo
Plancha de concreto para 30 corales		60	\$ 1,200.00	\$ 72,000.00		\$72,000.00
Personal para instalar vivero						
CONSIDERA		Unidad				
		día	días	subtotal		
supervisor		1500	15	\$ 22,500.00		\$70,500.00
Buzo 1		1200	15	\$ 18,000.00		
Buzo 2		1200	15	\$ 18,000.00		
Capitán		800	15	\$ 12,000.00		
Subtotal						
Combustible						
Insumos		litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes	costo
Gasolina		50	\$ 15.96	\$ 798.00	30	\$23,940.00
Número de viajes					2 por día	
TANQUES						
		Tanques/día	precio	Número tanques	Número días	Costo
Costo de la renta		8	\$ 50.00	400	15	\$ 6,000.00

ETAPA 2		PRODUCCIÓN DE COLONIAS PARA ABASTECER EL VIVERO MARINO				
				Costo Etapa 2	\$ 57,672.00	
Producción de colonias para el vivero						
Esta etapa considera la producción de:						
	140	fragmentos por día				
	980	fragmentos por etapa				
COSTOS						
Personal para colecta						
CONSIDERA						
	Unidad					
	Monto	días		subtotal		
supervisor	\$ 1,500.00	2		3,000		
Buzo 1	\$ 1,200.00	2		2,400		
Buzo 2	\$ 1,200.00	2		2,400		
Capitán	\$ 800.00	2		1,600		
	Subtotal					\$ 9,400.00
Personal						
CONSIDERA						
	Unidad					
	Monto	días		subtotal		
supervisor	\$ 1,500.00	7		10,500		
Buzo 1	\$ 1,200.00	7		8,400		
Buzo 2	\$ 1,200.00	7		8,400		
Capitán	\$ 800.00	7		5,600		
	Subtotal					\$32,900.00
Combustible						
Insumos	litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes	costo	
Gasolina	50	15.96	798	14	\$11,172.00	

ETAPA 3		MONITOREO DEL VIVERO MARINO			
				Costo Etapa 3	\$ 283,104.00
	Monitoreo de las colonias en el vivero				
	Limpieza de las estructuras				
	Manejo de las colonias en el vivero				
	COSTOS				
	Personal				
	CONSIDERA	Unidad			
		día	días/mes	costo/mes	Costo/año
	supervisor	\$ 1,500.00	4	\$ 6,000.00	\$ 72,000.00
	Buzo 1	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 57,600.00
	Buzo 2	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 57,600.00
	Capitán	\$ 800.00	4	\$ 3,200.00	\$ 38,400.00
	Subtotal	\$ 4,700.00		\$ 18,800.00	\$ 225,600.00
	Combustible				
	Insumos	litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes
	Gasolina	50	\$ 15.96	\$ 798.00	48
	Número de viajes				
	TANQUES				
		Tanques/día	precio	Número tanques	Número días
	Costo de la renta	8	\$ 50.00	400	48
					\$ 19,200.00

ETAPA 4		PRODUCCIÓN DE COLONIAS EN ACUARIO				
				Costo Etapa 4	\$	42,096.00
Producción de colonias en acuario		Número				
Esta etapa considera la producción de:		150	fragmentos por día			
		750	fragmentos por etapa			
COSTOS						
Personal para colecta						
CONSIDERA		Unidad				
		Monto	días	subtotal		
supervisor		\$ 1,500.00	2	3,000		
Buzo 1		\$ 1,200.00	2	2,400		
Buzo 2		\$ 1,200.00	2	2,400		
Capitán		\$ 800.00	2	1,600		
	Subtotal					\$ 9,400.00
Combustible						
Insumos	litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes	costo	
Gasolina	50	15.96	798	2	\$ 1,596.00	
TANQUES						
	Tanques/día	precio	Costo por día	Número días	Costo	
Costo de la renta	6	\$ 50.00	\$ 300.00	2	\$ 600.00	
Personal para trabajo en Acuario						
CONSIDERA		Unidad				
		Monto	días	subtotal		
supervisor		\$ 1,500.00	5	\$ 7,500.00		
Técnico 1		\$ 1,200.00	5	\$ 6,000.00		
Técnico 2		\$ 1,200.00	5	\$ 6,000.00		
Técnico 3		\$ 1,200.00	5	\$ 6,000.00		
	Subtotal					\$25,500.00
Materiales y Consumibles						
Insumos	Monto	Evento	Subtotal			
Herramienta e insumos de maquinaria de c	2500	2	\$ 5,000.00			\$ 5,000.00

ETAPA 5		MANTENIMIENTO Y MONITOREO DE COLONIAS EN ACUARIOS		
			Costo Etapa 5	225,600.00
Mantenimiento de organismos vivos				
Monitoreo y limpieza de los Acuarios				
Reparación y adecuación de sistemas de soporte de vida				
COSTOS				
Personal				
CONSIDERA		Unidad		
		Monto	Meses	subtotal
	Técnico 1	\$ 8,000.00	12	\$ 96,000.00
	Técnico 2	\$ 8,000.00	12	\$ 96,000.00
	Subtotal			\$ 192,000.00
Materiales y Consumibles				
Insumos		Monto	Meses	Subtotal
	Alimento vivo y suplementos alimenticio	2000	12	\$ 24,000.00
	Material de electricidad, ferretería y tlapa	800	12	\$ 9,600.00
	Subtotal			\$ 33,600.00

ETAPA 6		SIEMBRA DE FRAGMENTOS					
			Costo Etapa 6	\$ 362,384.00			Consideración
Siembra de 150 colonias por día en los sitios de restauración							
Incluye							
	Esta etapa considera la siembra de 150 colonias	Número	150	por día			600 1200
COSTOS							
		Total	600	semestre			
			1200	año			
Personal							
CONSIDERA		Unidad					
		día	días	costo/evento	Costo/año		
	supervisor	\$ 1,500.00	4	\$ 6,000.00	\$ 12,000.00		
	Buzo 1	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Buzo 2	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Buzo 3	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Buzo 4	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Buzo 5	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Buzo 6	\$ 1,200.00	4	\$ 4,800.00	\$ 9,600.00		
	Capitán	\$ 800.00	4	\$ 3,200.00	\$ 6,400.00		
	Subtotal	\$ 9,500.00		\$ 38,000.00			\$ 76,000.00
Combustible							
Insumos		litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes	costo/evento	Costo/año
	Gasolina	50	\$ 15.96	\$ 798.00	4	\$ 3,192.00	\$ 6,384.00
Número de viajes							
TANQUES							
		Tanques/día	precio	Costo por día	Número días	Costo/evento	Costo/año

ETAPA 7		MONITOREO DEL ÁREA DE RESTAURACIÓN				
Esta etapa considera dos sitios dos días /semestre		Costo Etapa 7		\$	43,592.00	
COSTOS						
Personal						
CONSIDERA	Unidad					
	día	días	costo/semestre	Costo/año		
supervisor	\$ 1,500.00	2	\$ 3,000.00	\$ 6,000.00		
Buzo 1	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Buzo 2	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Buzo 3	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Buzo 4	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Buzo 5	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Buzo 6	\$ 1,200.00	2	\$ 2,400.00	\$ 4,800.00		
Capitán	\$ 800.00	2	\$ 1,600.00	\$ 3,200.00		
Subtotal						\$38,000.00
Combustible						
Insumos	litros / viaje	precio	Costo viaje	Número viajes	costo/semestre	Costo/año
Gasolina	50	\$ 15.96	\$ 798.00	2	\$ 1,596.00	\$ 3,192.00
Número de viajes						
TANQUES						
	Tanques/día	precio	tanques/día	Número días	Costo/semestr	Costo/año
Costo de la renta	12	\$ 50.00	24	2	\$ 1,200.00	\$ 2,400.00

6.5.2. Costos de producción de reclutas sexuales y siembra en sitios de restauración

En esta sección se presenta una estimación de los costos de restauración mediante producción de reclutas sexuales bajo una serie de supuestos y consideraciones similares a los de la propagación clonal en algunos aspectos, mientras que en otros aspectos se consideraron actividades únicas al cultivo de los reclutas:

Las principales actividades que se llevaron a cabo en el proyecto a través de un tiempo de 4 años, incluyen:

- Producción de un total de 65 reclutas sexuales (con un rango de edades entre 2 y 6 años), todos en viveros marinos o bien sembrados en arrecifes coralinos.
- Un programa de mantenimiento de cultivo de corales en los acuarios de Xcaret y de la UNAM, incluyendo el monitoreo y limpieza de los acuarios, la reparación y adecuación de los sistemas de soporte de vida.
- La construcción e instalación de un vivero marino de 4 planchas de concreto, con capacidad para 20 colonias cada una, para un total de 80 colonias.
- Monitoreo de los reclutas sexuales, tanto en viveros terrestres, así como en viveros marinos.
- Eventos de siembra de los reclutas sexuales.
- El costo de la infraestructura de los acuarios, incluyendo los sistemas de abasto de agua, filtración y bombeo; así como los costos de operación de los mismos (gastos de luz, agua, etc).

- Las diferentes actividades contemplan el pago de honorarios de las personas que se requiere; aunque durante la ejecución de este estudio esos gastos fueron cubiertos por las respectivas instituciones que participaron.

Este ejercicio no considera:

- El costo de las embarcaciones para el trabajo de campo en mar, así como los costos del mantenimiento y reparación de las mismas. Ese gasto fue solventado por la Universidad Nacional Autónoma de México y por Xcaret.
- El costo de los equipos de buceo autónomo (SCUBA) que fueron necesarios para el trabajo de campo en mar (chaleco, regulador, neopreno, visor, aletas y lastre). Al inicio del proyecto se contó con equipo de la UNAM y Xcaret.
- El costo de determinar la diversidad genética de las colonias madre ni de las colonias producidas durante este proyecto. Este costo fue cubierto por un proyecto financiado por CONACYT a la UNAM.

Resumen de la estimación de costos:

Bajo los criterios y consideraciones enunciadas anteriormente, se estimó un costo total de \$1,381,441.00 para las acciones de restauración a base de reclutas sexuales por parte de la UNAM y Xcaret durante 4 años, de acuerdo a la siguiente información:

	Reclutas criadas en acuarios, viveros marinos y siembra en arrecife de restauración
Fabricación de redes incluyendo costos de un técnico	\$ 25,000.00
Fabricación de bases de asentamiento incluyendo costos de un técnico	\$ 25,000.00
Recolecta de gametos en el campo incluyendo costos de técnicos, embarcaciones y gasolina	\$ 30,000.00
Cultivo de corales en el laboratorio hasta asentamiento incluyendo costos de técnicos	\$ 25,000.00
Mantenimiento de reclutas de coral en acuarios por dos semanas	\$ 65,423.00
Trabajo de campo para siembra incluyendo costos de técnicos, embarcaciones y gasolina	\$ 10,000.00
Mantenimiento de reclutas de coral en acuarios por dos años	\$ 1,201,018.00
SUMA	\$ 1,381,441.00

Se estima que el costo de producción, con la metodología empleada por la UNAM y Xcaret, de un recluta de coral es de \$21,253, con base en la producción de 65 colonias producidas únicamente por UNAM y Xcaret y considerando los costos de la infraestructura de los acuarios, incluyendo los sistemas de abasto de agua, filtración y bombeo y los costos de operación de los mismos (gastos de luz, agua, etc). Si se considera una producción sin los costos operativos el costo total es de \$115,000.00, por un costo de \$1,769 por colonias producidas.

6.6. Diagnóstico de los logros del proyecto

Las acciones de restauración activa que se realizaron en el presente estudio sientan un precedente, en cuanto a la visión del grupo de trabajo interdisciplinario para lograr la recuperación de 2 áreas arrecifales que fueron dañadas por encallamiento, dentro de un área natural protegida en el norte de Quintana Roo.

Al inicio del proyecto, en el año 2012, el grupo de trabajo reconoció que la experiencia y conocimiento disponibles en ese momento no eran suficientes para llevar a cabo una restauración de un área arrecifal bajo esquemas de probada eficiencia, como pudiera ser el caso de una reforestación terrestre. Como punto de partida se determinó que la simple práctica de coleccionar fragmentos de coral para propagarlos en el mar es una medida limitada y de corto alcance. Así mismo, se reconoció la necesidad de pasar la etapa de restringirse a atender contingencias ambientales mediante el rescate de colonias, y empezar a construir la capacidad, tanto técnica como de infraestructura, para abordar de una manera más integral y programada el tema de la restauración de arrecifes.

De este modo, las actividades que se realizaron en este estudio consistieron en diferentes procesos de investigación para desarrollar la biotecnología que permitiese producir colonias de coral, tanto por propagación clonal como por reproducción sexual; para definir los procesos de su manejo en cultivo, tanto en acuarios como en el mar; para mejorar los métodos de siembra de colonias; así como establecer un seguimiento detallado del ecosistema para ir construyendo una estrategia de restauración más robusta. Aunado a este proceso se invirtió en mejorar la infraestructura de los viveros y de los acuarios para mantener un stock de colonias continuamente. Todas estas acciones estuvieron encaminadas a fortalecer las capacidades institucionales para atender el tema de la restauración de arrecifes en México, y poder establecer en el largo plazo un Centro Productor de Coral en el Caribe Mexicano.

A continuación se analizan diferentes aspectos que se consideran logros y avances de las acciones de restauración activa que se llevaron a cabo en el presente estudio:

6.6.1. Elección de los sitios:

La elección de los sitios a restaurar fue uno de los aspectos más importantes que se tomaron en cuenta para el desarrollo del proyecto, con la intención de tener una mayor probabilidad de éxito. Bajo esta perspectiva, se eligieron sitios que habían sido dañados por encallamiento, en donde la recuperación natural no había logrado restituir el daño generado en la estructura y función de los sitios. Al hacer esta elección se buscó evitar que la fuente que había generado el daño o degradación del arrecife ya no existiera, y que fuera poco probable que se volviera a presentar. De este modo se trató de evitar que las colonias de coral que se fueran a sembrar sufrieran el mismo daño que las que se habían perdido en esos sitios.

6.6.2. Esquema de siembras sucesivas:

Otro aspecto relevante fue que la restauración de los sitios se realizó a través de siembras sucesivas a lo largo de los 4 años que duró el proyecto. La primera siembra se llevó a cabo al inicio del proyecto, con un lote de colonias que ya existía previamente en el vivero marino del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc de la CONANP; y posteriormente 5 siembras semestrales con colonias producidas en el proyecto.

Esta estrategia permitió evaluar de manera continua la adaptación de las especies que se sembraron en diferentes secciones del área a restaurar, encontrando los sitios más adecuados para cada una. Además, durante cada evento de siembra se logró perfeccionar la técnica empleada en todo el proceso, incluyendo la exportación y transportación de las colonias desde el vivero hacia los sitios de restauración, el proceso para retirar la base de PVC en las que se cultivan las colonias, su marcaje, la elección y preparación del sitio de siembra, y la propia técnica para fijar la colonia al sustrato. Bajo este esquema fue posible evaluar la sobrevivencia y el crecimiento de las colonias que se habían sembrado en eventos anteriores, lo cual era un indicio a seguir para el tipo de especies que era conveniente sembrar en los siguientes eventos, así como los sitios más adecuados para fijarlas dentro del área de restauración; e incluso la posición y la distancia entre colonias para su distribución.

En otro aspecto, esta estrategia de siembra en eventos semestrales permitió acoplar la producción de colonias a lotes pequeños, en donde no era necesario realizar colectas excesivas y poder aprovechar los fragmentos de oportunidad que existen en el medio natural. De otra forma, la colecta de material del medio natural que sería necesaria para producir lotes muy grandes de colonias en tiempos cortos pudiera ser destructiva.

6.6.3. Recuperación de la función y estructura en las áreas de restauración.

La restauración activa que se realizó mediante la siembra de colonias de coral en las áreas dañadas, propició la restitución de ciertos atributos, relacionados con la función y la estructura del ecosistema que se intervino.

En cuanto a la estructura del ecosistema, la siembra de corales tuvo un efecto directo sobre 2 atributos: la cobertura coralina y la complejidad estructural. El incremento de cobertura coralina que se logró a través de la siembra de corales fue de 4.8% para Arrecife Cuevones y de 5.4% para Arrecife Manchones, considerando solamente las especies intervenidas. El incremento de cobertura de estas especies representó una ganancia de 1.2 veces la cobertura inicial que existía en Arrecife Cuevones (3.9%) y de 8.9 veces la de Arrecife Manchones (0.6%) (Tabla 43).

Tabla 43. Incremento de cobertura coralina por efecto de la Restauración activa mediante siembra de corales en 2 arrecifes.

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)	12.60	8.6	8.62	5.9
Incremento	3.66	4.76	6.07	5.36

**Acropora cervicornis*, *Acropora palmata*, *Orbicella annularis*, *Montastraea cavernosa*, *Porites astreoides* y *Undaria agaricites*.

Sin embargo, al analizar el incremento en la cobertura coralina total de cada área se obtuvo un incremento del 3.7% para Cuevones y de 6.1% para Manchones. Esta diferencia se debe a los cambios en cobertura que presentó la especie de coral *Porites astreoides*, que era la especie dominante al inicio de la intervención, la cual cubría un porcentaje del 5.1% del sustrato en Cuevones, y del 2% en Manchones. Las colonias de esta especie tienen una forma de crecimiento incrustante, y se considera una especie

ruderal, característica de sitios perturbados y/o de etapas tempranas en el proceso de la sucesión ecológica; por lo que se pretende reemplazar su dominancia por otras especies de coral constructoras arrecifales, como las de los géneros *Acropora* y *Orbicella/Montastraea*. Durante el período de restauración se observó un decremento continuo en Cuevones, teniendo una reducción del 1.1% de su cobertura al final de la intervención; mientras que en Manchones presentó un leve crecimiento, que se estimó en 0.7% en los 4 años. Esta situación es de relevancia ecológica, ya que a través de la intervención mediante la siembra de colonias de coral se logró reemplazar la dominancia de las especies de coral para tener una mayor presencia de especies constructoras de arrecifes coralinos, con lo que se pretende tener una mayor contribución a la acreción arrecifal. Asociado a la siembra de corales constructores arrecifales, y al aumento de la cobertura coralina en los sitios de restauración, también se observó un incremento de la complejidad del sustrato 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 ocurren en el arrecife como consecuencia de la siembra de corales también tienen un efecto indirecto sobre la funcionalidad del ecosistema. En primera instancia, el incremento en la complejidad del sustrato en los sitios restaurados genera heterogeneidad ambiental, ya que la presencia de corales ramificados y masivos propician la formación de microhábitats, sitios de refugio, de crianza y alimentación para una mayor cantidad de especies; tanto de biota sésil como de peces e invertebrados bentónicos móviles como son los equinodermos, moluscos y crustáceos (Tablas 44 y 45). Este cambio se asocia directamente con un incremento de la biomasa y biodiversidad en los sitios intervenidos. 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 Sphyrnidae) 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 (Tunncliffe 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.

TABLA 44. Cambios en la heterogeneidad ambiental como efecto de la restauración activa en Arrecife Cuevones.


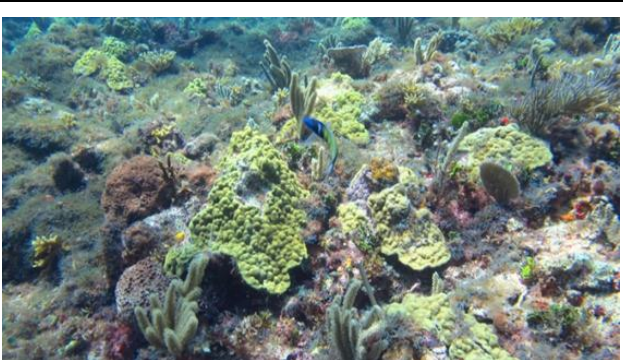
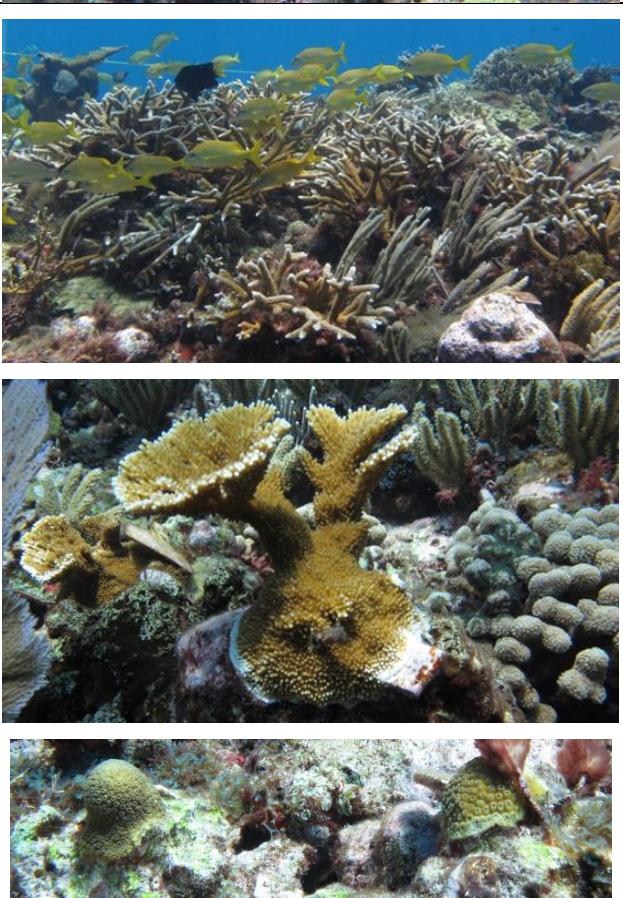


<p>ARRECIFE CUEVONES, PUNTA CANCÚN. PNAOIMPCyPN</p> <p>1997. Encallamiento de la embarcación Leeward.</p> <p>Matriz calcárea compactada. Pérdida total de biota marina sésil, pérdida de rugosidad y heterogeneidad ambiental.</p>	
<p>2012. Condición inicial antes de la Restauración.</p> <p>Recuperación natural del sitio después de 15 años con dominancia de corales incrustantes de la especie <i>Porites astreoides</i>, gorgonáceos y algas. Baja cobertura de corales constructores de arrecife de los géneros <i>Acropora</i> y <i>Orbicella</i>.</p>	
<p>2016. Al término de la restauración activa, después de 4 años, se logró el incremento de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura coralina • Biodiversidad • Biomasa • Complejidad estructural • Comunidad de peces <p>Cuadrante C, D y E con dominancia de <i>Acropora cervicornis</i> y mayor presencia de peces (arriba).</p> <p>Cuadrantes A y B con dominancia de <i>Acropora palmata</i>, y colonias del género <i>Orbicella</i> (en medio y abajo).</p>	

TABLA 45. Cambios en la heterogeneidad ambiental como efecto de la restauración activa en Arrecife Manchones.

<p>ARRECIFE MANCHONES, ISLA MUJERES. PNACOIMPCyPN</p> <p>2012. Condición inicial antes de la Restauración.</p> <p>Recuperación natural del sitio después de 10 años baja cobertura coralina, dominancia de <i>Porites astreoides</i>, gorgonaceos y algas. Ausencia de corales constructores de arrecife de los géneros <i>Acropora</i> y <i>Orbicella</i>.</p>	
<p>2016. Al término de la restauración activa, después de 4 años, se logró el incremento de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura coralina • Biodiversidad • Biomasa • Complejidad estructural • Comunidad de peces <p>Cuadrante de restauración con dominancia de <i>Acropora cervicornis</i> y mayor presencia de peces (arriba).</p> <p>Área aledaña en Arrecife Manchones, restaurada en el 2011 por la CONANP, en donde se registró liberación de gametos en agosto de 2016</p>	

6.6.4. Establecimiento de un vivero de coral modular

Un resultado relevante que se logró a partir de este programa de restauración activa fue el establecimiento de un vivero de coral modular. Este concepto de modularidad se refiere a que las colonias de coral se producen tanto por vía sexual como asexual; y que se mantienen en diferentes sistemas de cultivo para replicar lotes de producción (Figura 129).

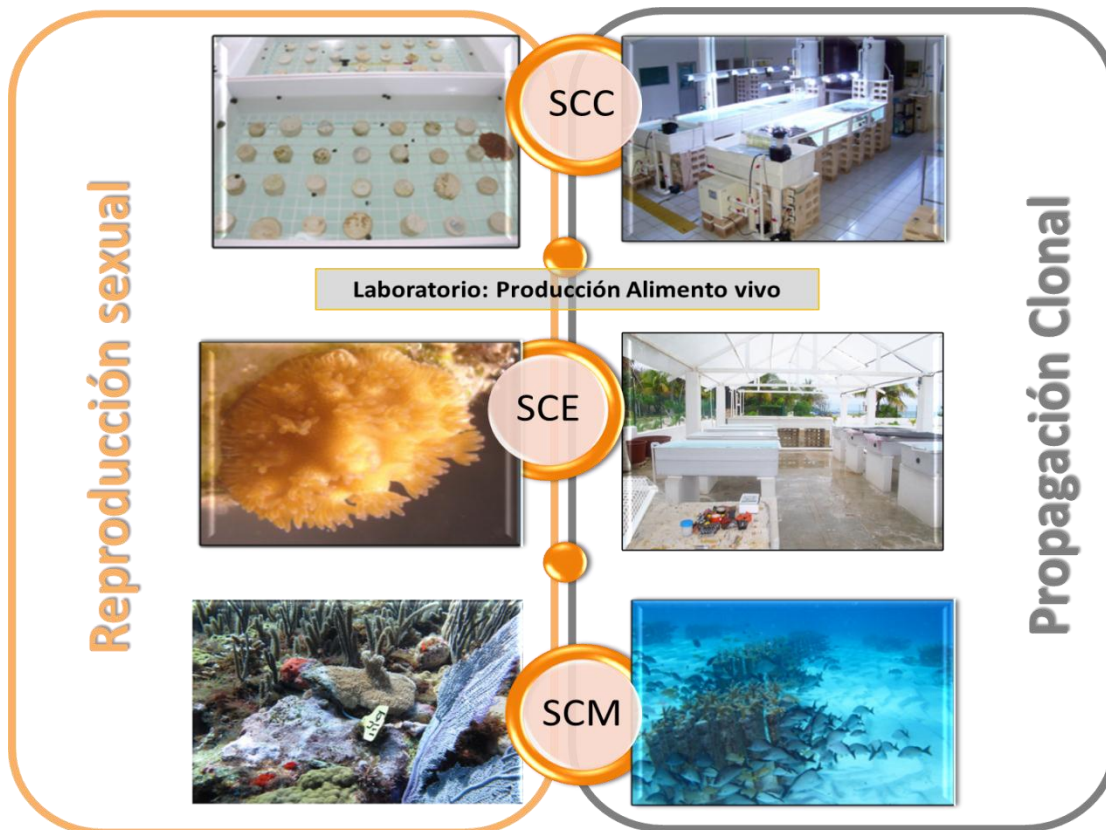


FIGURA 129. Vivero de coral modular. Las colonias de coral se producen mediante propagación clonal y por reproducción sexual; y se mantienen en diferentes sistemas de cultivo para su crecimiento: SCC (Sistema de Cultivo Controlado), SCE (Sistema de Cultivo Externo o semi-controlado), SCM (Sistema de Cultivo Marino)

La conformación de este vivero permite el traslado de colonias entre los módulos, de acuerdo a sus requerimientos, para finalmente ser introducidas en las áreas de restauración. 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. A continuación se explica el proceso de transferencia de las colonias de coral, desde la colecta de material vivo que se requiere del medio natural, su mantenimiento y traslado entre los diferentes sistemas de cultivo, hasta ser trasplantadas en el área de restauración (Figura 129):

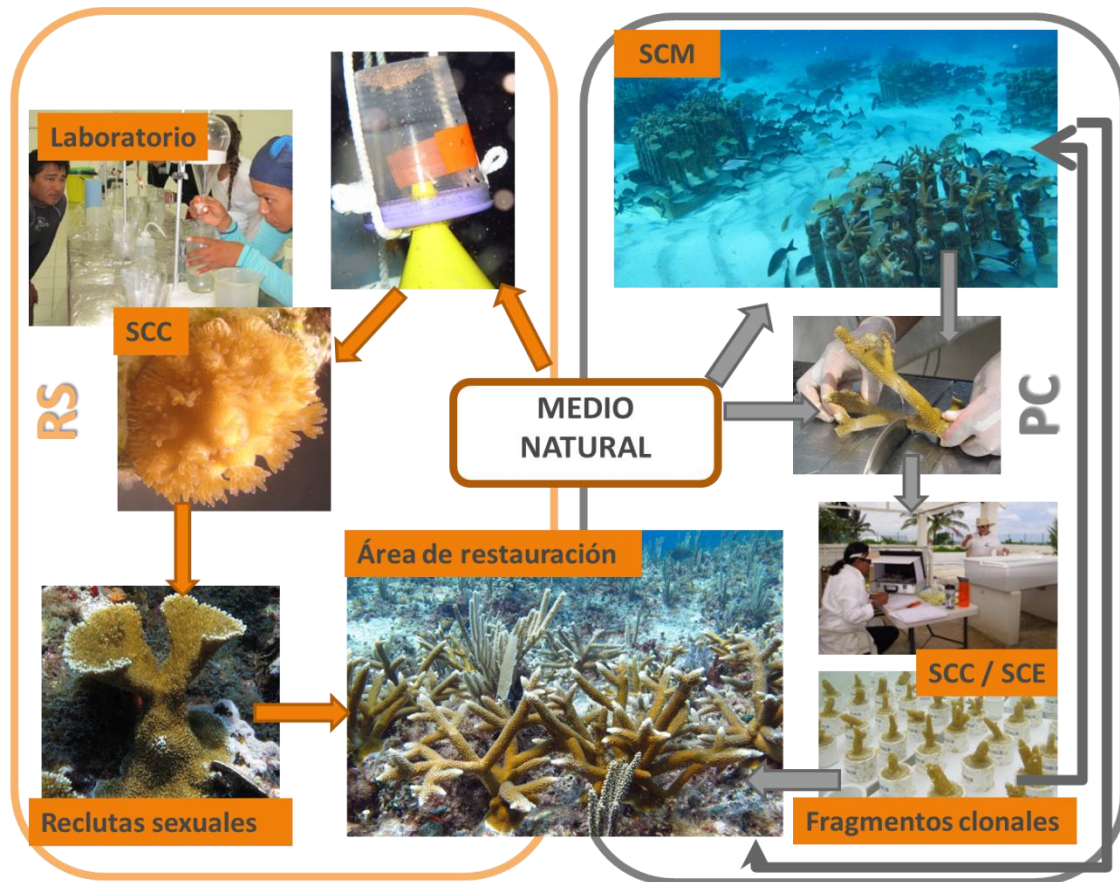


FIGURA 130. Esquema de transferencia de colonias de coral, a partir de la colecta que se realiza en el medio natural, los diferentes procesos que ocurren en los sistemas de cultivo para producir colonias, tanto por propagación clonal (PC) como por reproducción sexual (RS), hasta ser sembradas en las áreas de restauración.

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 sexuales, 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.

6.6.5. Programa de Monitoreo:

Otro elemento fundamental fue la implementación de un Programa de Monitoreo para evaluar la efectividad del proyecto. Se considera que un monitoreo continuo, enfocado a estimar las tasas de sobrevivencia y crecimiento de las colonias producidas, así como de las colonias trasplantadas en los sitios de restauración, es indispensable para determinar la efectividad de las acciones ejecutadas en el proyecto. Del mismo modo, mantener un seguimiento constante del progreso de la cobertura coralina en los sitios intervenidos permite evaluar el impacto de la restauración en el ecosistema.

En cuanto a los métodos empleados, se considera que el seguimiento trimestral para evaluar la sobrevivencia y el crecimiento de las colonias en cultivo y semestral para las colonias trasplantadas es adecuado, considerando las tasas de crecimiento de los corales. Los métodos para estimar el crecimiento de las colonias a través de su altura se considera que fue limitado, ya que la mayoría de las colonias presentan formas de crecimiento ramificados o masivos, por lo que el crecimiento en ramas y/o volumen está subestimado. En este sentido es necesario realizar una adecuación al método de medición para emplear alguno que pueda subsanar este error en la estimación del tamaño de las colonias. Uno de ellos podría ser el que considere algún tipo de fotografía 3D. El seguimiento de la cobertura coralina a través de fotocuadrantes resultó ser una herramienta valiosa, ya que se cuenta con un registro fotográfico de toda la superficie trabajada. La periodicidad de este muestreo de manera semestral permitió evaluar adecuadamente los cambios que se presentaron en las áreas restauradas. La estimación de la cobertura coralina mediante el análisis de las fotografías podría generar valores más precisos con el empleo de programas para digitalizar áreas.

Finalmente, se reconoce la necesidad de construir un método de monitoreo específico para restauración de arrecifes coralinos que permita evaluar de manera más robusta los cambios en las áreas intervenidas con siembra de corales. Este monitoreo deberá considerar diferentes atributos de la estructura y función de las áreas intervenidas, en comparación con áreas objetivo o de control, como son las condiciones físicas, la composición de especies presentes, la diversidad estructural, las funciones ecosistémicas, la presencia/ausencia de amenazas, etc.

6.6.6. Colaboración interinstitucional y fortalecimiento de capacidades

El programa de restauración activa que se llevó a cabo en este estudio fue resultado de la colaboración entre las instituciones participantes, logrando generar, reforzar y/o ampliar las capacidades de cada una en el desarrollo de biotecnología para la producción de colonias de coral, su manejo en cultivo y posterior traslado a los arrecifes de coral dañados o degradados.

En el caso del CRIP Puerto Morelos del INAPESCA se logró mejorar la infraestructura para los diferentes sistemas de cultivo en acuario (SCC y SCE), perfeccionando su

funcionamiento e incrementando su capacidad. De igual manera se logró definir técnicas de manejo de corales en cultivo, esquemas de alimentación y técnicas de propagación, que fueron aprendidas a través de los diseños experimentales que se condujeron durante el proyecto.

En la CONANP se logró incrementar la capacidad del sistema de cultivo marino (SCM) que existe en el Bajo Pepito. También se logró mejorar las técnicas de colecta de material biológico, el manejo de colonias para su traslado, el mantenimiento del vivero, y las técnicas de siembra de colonias en las áreas de restauración.

La UNAM logró un avance importante en la definición de la estrategia de producción de reclutas sexuales, incluyendo la colecta de gametos, el cultivo de larvas, el proceso de asentamiento y metamorfosis, así como el manejo de reclutas en sistemas de acuario. La UNAM impartió capacitación a las otras instituciones que colaboran en el proyecto para participar en los diferentes procesos para la producción de reclutas sexuales, coordinando grupos de trabajo simultáneos durante los eventos reproductivos. Un logro relevante fue la producción de 65 reclutas sexuales de la especie *Acropora palmata* de los cuales 29 reclutas de 3 y 4 años de edad fueron trasplantados en una de las áreas de restauración (Arrecife Cuevones, en el PNCOIMP CPN). El resto de los reclutas sexuales producidos por la UNAM la mayoría están en un vivero marino, algunos están sembrados en una Unidad Arrecifal en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y el resto están en exhibición en el EcoParque Xcaret.

En el acuario de XCARET se concretó la capacidad para producción y manejo de reclutas sexuales en acuarios, logrando incrementar la eficiencia en las tasas de sobrevivencia y crecimiento de los organismos en cultivo; y su participación en la producción de reclutas sexuales fue relevante para el proyecto.

El ECOSUR logró definir los patrones de sucesión que ocurren en las áreas contiguas a las áreas de restauración, determinando el efecto del reclutamiento de corales, la cobertura de algas y presencia de herbívoros, logrando definir aspectos ecológicos importantes a considerar en las propuestas de restauración.

Finalmente, el proyecto permitió fortalecer la colaboración entre las instituciones participantes, manteniendo una visión interdisciplinaria para la ejecución del proyecto. Se mantuvo una estrecha colaboración para el trabajo de campo entre la CONANP y el INAPESCA, tanto en el vivero marino como en las áreas de restauración. ECOSUR contó con el apoyo de la CONANP para el muestreo en las áreas de restauración. Se tuvo una colaboración muy productiva entre la UNAM y XCARET para la producción de reclutas sexuales. Y se mantuvieron reuniones de trabajo entre los responsables de las diferentes instituciones para el desarrollo del proyecto e integración de los resultados.

Al término del proyecto, las áreas restauradas quedan bajo el manejo de la CONANP, al igual que el vivero de coral, considerando dentro de sus programas operativos la continuación del monitoreo y mantenimiento de las áreas restauradas con el presente proyecto. Adicionalmente, se contempla la búsqueda de nuevos recursos financieros para replicar los esfuerzos de restauración que se llevaron a cabo con este proyecto e incrementar los sitios restaurados dentro de esta área natural protegida. Cabe mencionar, que dentro del vivero que se trabajó con este proyecto se cuenta con un stock de colonias que pueden ser empleados para futuros proyectos.

6.7. Recomendaciones

6.7.1. Propuestas de acciones para evitar deterioro del sistema

El deterioro de los arrecifes coralinos se ha presentado de manera generalizada a nivel mundial en las últimas décadas, a causa de actividades antropogénicas relacionadas con el desarrollo costero y a nivel global por el cambio climático, lo que ha ocasionado la pérdida de cobertura coralina de manera paulatina y por eventos masivos, en detrimento de los bienes y servicios que brindan (Guzmán 1991, Ostrander et al. 2000).

Para evitar que continúe este deterioro de los arrecifes coralinos se requiere de políticas de manejo y conservación de las áreas que ayuden a mejorar a escala local y de manera eficaz la calidad del agua, la modificación del litoral costero, evitar la fragmentación de los ecosistemas costeros y una regulación efectiva del uso de estos ecosistemas. A nivel global el reto es detener los agentes que causan el cambio climático, a la par de implementar acciones de adaptación al cambio climático ya existente.

Únicamente atendiendo esta visión de cambio se puede concebir la implementación de programas de restauración de áreas arrecifales efectivos, que ayuden a revertir el daño que se ha ocasionado a estos ecosistemas. Por último, es importante considerar que en el manejo de estos ambientes tan importantes por los bienes y servicios que nos brindan, es mucho mejor conservarlos que restaurarlos, porque es más fácil, más barato y más efectivo.

Ahora bien, en el caso específico de las áreas arrecifales que fueron restauradas mediante este proyecto, el factor de impacto que ocasionó el deterioro del sistema fue el encallamiento de embarcaciones, por lo que se considera un accidente, de incidencia local y con una temporalidad puntual. Estos accidentes ocasionan daños físicos a la estructura del arrecife con su consecuente degradación, afectando a los organismos marinos que los habitan. El daño directo genera pérdida de la cobertura coralina y demás organismos sésiles, y en ocasiones deterioro de la matriz calcárea. De manera acumulativa, el accidente puede incluir la contaminación del agua por derrame de combustible de la embarcación; así como daños adicionales ocasionados por las maniobras para el retiro de la embarcación. Siendo así, las propuestas de acciones tendientes a evitar que se repitan estos accidentes están relacionadas con la existencia de señalamientos de navegación en los sitios para evadir las zonas de arrecife, en conjunto con la precisión de las cartas de navegación. Adicionalmente, se considera importante favorecer la gestión para la implementación de las acciones contempladas en el manual coordinado de procedimientos ambientales, administrativos y legales para la atención inmediata a los arrecifes por encallamientos (Arellano et al, 2009).

6.7.2. Consideraciones para las acciones de restauración a futuro

A continuación se presenta una lista de recomendaciones para acciones de restauración a futuro:

- No realizar acciones de restauración activa mediante siembra de colonias de coral en sitios en donde no se conocen los factores que ocasionaron la degradación del ecosistema, o donde estén identificados pero que no se puedan revertir o controlar a futuro.

- Procurar que la restauración activa de un sitio se haga en varios eventos de siembra de corales para valorar la respuesta de las colonias sembradas y poder hacer adecuaciones durante las siguientes siembras.
- Contar con un programa de monitoreo del crecimiento y sobrevivencia de las colonias de coral sembradas; así como del cambio en la cobertura coralina del sitio.
- Delimitar y marcar el área de restauración para futura referencia del sitio.
- Desarrollar un programa de monitoreo específico para restauración de arrecifes que permita evaluar cambios en diferentes atributos de la estructura y función de las áreas intervenidas, y que contemple la comparación con áreas objetivo o de control, para contar con una herramienta más robusta que evalúe la efectividad de las acciones emprendidas.
- Mantener un programa de monitoreo a largo plazo en las áreas de restauración, y evaluar el potencial reproductivo de las colonias sembradas.
- Manejar la producción de corales para abasto de los módulos del vivero en lotes semestrales, utilizando fragmentos de oportunidad, con la intención de no requerir colectas excesivas que puedan ocasionar daño a las poblaciones naturales.
- Programar siembra de corales en las áreas de restauración mediante eventos semestrales, en vez de realizar eventos únicos. La intención es evaluar el efecto de las siembras anteriores y adaptar la estrategia empleada, reforzando el incremento de cobertura coralina de manera paulatina.
- Mejorar los cálculos de los costos de restauración para definir diferentes escenarios de restauración y cotizar el costo de restauración en función del área a restaurar.
- Mejorar el manejo de las colonias de coral producidas para tener un mayor control de la representación de genotipos, tanto de la procedencia y destino de las colonias producidas por propagación clonal, como el registro de las colonias donadoras de gametos para la producción de reclutas sexuales.

7. ANEXOS

7.1. Bases de datos:

7.1.1. Sitios de estudio

Se presentó en el informe de la 1ª etapa (“ANEXO 7.1.1. Sitios de estudio”).

7.1.2. Inventario del vivero

Se presenta adjunto documento excell con la base de datos del inventario del vivero con nombre:

- ANEXO 7.1.2.1 Inventario vivero 8

Adicionalmente se incluye el registro de parámetros fisicoquímicos de los sistemas de acuario:

- ANEXO 7.1.2.2 Registro de parámetros fisicoquímicos 8

Cabe comentar que estas bases de datos incluyen el registro de todas las etapas del proyecto hasta la fecha, así como las coordenadas geográficas, atendiendo a la observación realizada por CONABIO en las evaluaciones de las etapas anteriores.

7.1.3. Inventario del área restaurada

Se presenta adjunto documento excell con la base de datos del inventario de las colonias sembradas en las áreas restauradas con nombre

- ANEXO 7.1.3. Inventario ÁREAS RESTAURADAS 8

Cabe comentar que esta base de datos incluye el registro de todas las etapas del proyecto hasta la fecha, así como las coordenadas geográficas, atendiendo a la observación realizada por CONABIO en las evaluaciones de las etapas anteriores.

7.1.4. Proceso sucesional

Las bases correspondientes ya fueron entregadas en etapas anteriores.

7.2. Memoria fotográfica:

7.2.1. Registro fotográfico de las áreas restauradas

En esta etapa se presenta el registro fotográfico del seguimiento de los sitios a restaurar. Los registros se presentan en los siguientes anexos:

- ANEXO 7.2.1. Registro fotográfico del PROYECTO.

7.2.2. Registro fotográfico de los procesos sucesionales

Las bases correspondientes ya fueron entregadas en etapas anteriores.

7.2.3. Selección de fotos 7ª etapa.

Se anexa una carpeta titulada "Selección de fotos proyecto" a solicitud de la CONABIO que contiene fotos representativas de las diferentes actividades del proyecto; así como un archivo de excell "Registro de fotos del proyecto.xlsx" con la descripción de cada una de las fotos.

8. LITERATURA CITADA

- Anderson AJ, Gorley RN y Clarke KR. 2008. *PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods*. PRIMER-E, Plymouth, UK.
- 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. 171p.
- Almada-Villela, P., Sale, P., Gold-Bouchot G. y Kjerfve, B. 2003. Manual de métodos para el Programa de Monitoreo Sinóptico del SAM. Métodos Seleccionados para el monitoreo de parámetros físicos y biológicos para utilizarse en la región mesoamericana. Proyecto para el SAM. Unidad Coordinadora del Proyecto Coastal Resources Multi-complex Building. Belice. 158 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.
- Cargill S y Chapin F. 1987. Application of successional theory to tundra restoration: a review. *Arctic and Alpine Research* 19:366-372.
- Clarke KR y Gorley RN. 2006. *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. PRIMER-E, Plymouth, UK.
- Edwards A, Clark S (1998) Coral transplantation: A useful management tool or misguided meddling? *Mar Pollut Bull* 37:474-487
- Edwards, A.J. (ed.) (2010). Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program: St Lucia, Australia. ii + 166 pp.
- Erwin, P. and A. Szmant (2010). "Settlement induction of *Acropora palmata* planulae by a GLW-amide neuropeptide." *Coral Reefs* 29(4): 929-939.
- Guzmán H. 1991. Restoration of Coral Reefs in Pacific Costa Rica. *Conservation Biology* 5:189-195.
- Harrison, P. L. (2011). Sexual Reproduction of Scleractinian Corals. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Z. Dubinsky and N. Stambler, Springer Netherlands: 59-85.
- Hendler G, Miller JE, Pawson DL y Kier PM. 1995. *Sea stars, sea urchins, and allies echinoderms of Florida and the Caribbean*. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Herrera-Silveira, J.A., Cortés Balán, T.O. Ramírez Ramírez, J. y Osorio I. 2010. Monitoreo de la condición trófica de la columna de agua de los ambientes costeros del Parque Marino Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc: Segunda Etapa. Proyecto GZ002 CINESTAV-CONABIO-CONANP, Tercer informe, CINESTAV, 41pp.

- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, et al. (2007). "Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification." *Science* 318(5857): 1737-1742.
- Hughes, T. P. (1994). "Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef." *Science* 265: 1547-1551.
- Hughes, R. N. 1989. *A functional Biology of Clonal Animals*. Capman and Hall. London-New York. 331pp.
- Jaap W. 2000. Coral reef restoration. *Ecological Engineering* 15:345-364.
- Jokiel P, Brown E, Friedlander A, Rodgers S y Smith W (2001) *Hawaii coral reef initiative coral reef assessment and monitoring program (CRAMP) final report 1999–2000*. University of Hawaii
- Lindig-Cisneros R., 2009. Models of alternate states for planning and implementing restoration of production systems in Michoacán, México. En: Hobbs RJ y Suding KN (Eds.). *New models for ecosystems dynamics and restoration*. Society for Ecological Restoration International (SER), *Science and practice of ecological restoration*, pp. 311-322
- Mariño-Tapia I., R. Silva-Casarín, C. Enríquez-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. Lewellyn. 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature* 427: 533-536.
- Ostrander G, Armstrong K, Knobbe E, Gerace D y Scully E. 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*, Vol.6, Pag.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. 145pp.
- Precht WF, Aronson RB y Swanson DW. 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, et al. (2009). "New perspectives on ecological mechanisms affecting coral recruitment on reefs." *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences* 38: 437-457. Shearer, T., I. Porto, et al. (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.

- Shearer, TL. I. Porto y A.L. Zubillaga. 2009. Restoration of coral populations in light of genetic diversity estimates. *Coral Reefs* 28(3): 727-733.
- 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.
- Tunncliffe, V. 1981. Breakage and propagation of the stony coral *Acropora cervicornis*. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 78: 2427-2431.
- Yakob, L. y P.J. Mumby. 2011. Climate change induces demographic resistance to disease in novel coral assemblages. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(5): 1967-1969.
- Zar JH. 2009. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey.