

EFECTO DEL HURACÁN DELTA EN LOS ARRECIFES DEL NORTE DE QUINTANA ROO

2021

Nuria Estrada-Saldívar, Esmeralda Pérez-Cervantes, Eduardo Navarro-Espinoza, Fernando Secaira-Fajardo, y Lorenzo Álvarez-Filip.

EFFECTO DEL HURACÁN DELTA EN LOS ARRECIFES DEL NORTE DE QUINTANA ROO

2021

Nuria Estrada-Saldívar, Esmeralda Perez-Cervantes, Eduardo Navarro-
Espinoza, Fernando Secaira-Fajardo, y Lorenzo Álvarez-Filip.

AUTORES

Investigador Principal: Lorenzo Álvarez-Filip¹

Técnicos de proyecto: Nuria A. Estrada Saldívar¹, Esmeralda Pérez Cervantes¹, Eduardo Navarro Espinoza¹

Supervisión del proyecto: Fernando Secaira Fajardo²

¹ Biodiversity and Reef Conservation Laboratory, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto Morelos, México

² The Nature Conservancy

CITA

Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Navarro-Espinoza, E., Secaira-Fajardo, F. y Álvarez-Filip, L. (2022). Efectos del Huracán Delta en los arrecifes del Norte de Quintana Roo, UNAM-The Nature Conservancy.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a: el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, María Carmen García Rivas, Enrique Gallegos Aguilar, J. Arturo González González, E. Roberto Ibarra Navarro, Donny Esteban Canul, B. Elías Caamal Madrigal, M. en C. Fernando Negrete Soto, M. en C. Miguel Gómez Reali, M. en C. J. Antonio Quintero Pérez, M. en C. J. Edgar Escalante Mancera, Clarisa de Hoyos Jiménez, Sara M. Melo Merino, Alba González-Posada Martínez-Franco, Isis G. Martínez López, Javier González Barrios y Adolfo Tortolero Langarica.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	5
2.1 Área de estudio	6
2.1.1 Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	6
2.1.2 Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos	7
2.1.3 Reserva de la Biosfera del Caribe Mexicano	7
2.2 Indicadores de cambio para determinar el daño	9
2.3 Métodos para colecta de datos de cobertura de coral y rugosidad	10
2.3.1 Punto de intersección	10
2.3.2 Índice de rugosidad	11
2.3.3 Línea de intersección	11
2.3.4 Indicadores de la condición de la comunidad coralina	12
2.4 Metodología para procesar los datos del ortomosaico	13
2.4.1 Ortomosaico	13
2.5 Delimitación de parches de <i>Acropora palmata</i>	16
3. RESULTADOS	18
3.1 Cambios en los indicadores de cobertura	19
3.2 Evidencia de daño en colonias y fragmentos coralinos	23
3.3 Impacto en la integridad de colonias y parches de <i>Acropora palmata</i> en Arrecife Limones	25
4. CONCLUSIONES	30
5. REFERENCIAS	34
APÉNDICE 1	38



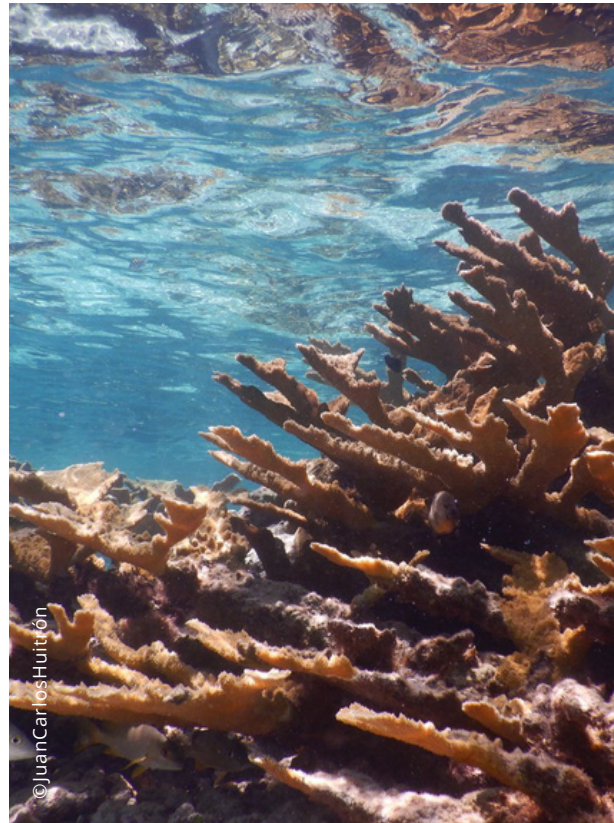
1 **INTRODUCCIÓN**

1 INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son los ecosistemas marinos con mayor biodiversidad del mundo; los cuales proporcionan servicios clave que apoyan el bienestar humano, como la protección costera, la provisión de hábitat para especies de importancia comercial y la producción de sedimentos (Moberg y Folke, 1999). Todos estos beneficios están relacionados con la capacidad de los corales escleractíneos para crear estructuras tridimensionales mediante la acumulación de carbonato de calcio (Woodhead et al., 2019). Sin embargo, a pesar de su importancia global, la cobertura de coral de estos ecosistemas ha disminuido rápidamente en las últimas décadas a nivel mundial (Pandolfi et al., 2003; Bellwood et al., 2004). Junto con el declive de la cobertura coralina, los arrecifes también pierden complejidad, lo que ocasiona cambios importantes en la composición de la comunidad que pueden afectar las funciones ecológicas y comprometer los servicios ecosistémicos (Alvarez-Filip et al., 2011; Graham et al., 2014). A pesar del declive generalizado de los corales y sus consecuencias asociadas, todavía existen arrecifes en excelentes condiciones, los cuales cuentan con una alta cobertura de coral, complejidad y alta biomasa de peces, a pesar de las condiciones ambientales y los factores socioeconómicos a los que están expuestos (Cinner et al., 2016; Lester et al., 2020). Estos sitios están dominados en gran medida por importantes corales formadores de arrecifes, que aún desempeñan un papel importante proporcionando un hábitat complejo para apoyar el reclutamiento y la supervivencia de peces (Huntington et al., 2017).

Para la región del Caribe, el coral cuerno de alce, *Acropora palmata* es el principal formador de arrecifes de la zona, gracias a su alta tasa de calcificación, y a su compleja estructura tridimensional que brinda complejidad al sistema debido creando un hábitat para una gran cantidad de peces e invertebrados (Sutherland et al. 2010; González-Barrios y Alvarez-Filip, 2018). Esta especie suele hallarse en profundidades no mayores a los 10 m, tanto en la cresta arrecifal, como en el arrecife frontal, comúnmente estos organismos forman densos grupos monoclonales (Aronson y Precht 2001). Desafortunadamente las poblaciones del coral cuerno de alce han sufrido graves disminuciones desde la década de 1980s, donde a consecuencia de la epidemia de la banda blanca se perdió el 80% de sus poblaciones (Gladfelter 1982), lo que representó uno de los mayores eventos de epizootias marinas registradas en su momento hasta la aparición del Síndrome Blanco en 2014. De igual forma, durante la década de 1990, la epizootia de la viruela blanca (i.e. Serratosis) continuó diezmando las poblaciones restantes del coral cuerno de alce desde Florida hacia el resto del Caribe (Patterson et al. 2002).

Debido a la mortalidad de *Acropora*, y la de otras especies, en el Caribe la cobertura de coral ha disminuido del 60% al 10% desde 1970, principalmente debido al cambio climático, actividades humanas y los fenómenos naturales como huracanes. Estos últimos son fenómenos atmosféricos comunes en todas las regiones tropicales, los cuales son parte del régimen de perturbaciones naturales a los que se encuentran sometidos los ecosistemas costeros (Nyström et al. 2000). Por lo general las comunidades coralinas por especies ramosas (i.e. *A. palmata*), tienden a ser más susceptibles a los eventos de huracanes, los cuales causan la fragmentación y desprendimientos de las colonias (Madin y Connolly, 2006; Bozec et al., 2015).



Debido a los efectos del cambio climático, estos fenómenos atmosféricos han incrementado su severidad y seguirá aumentando entre 1 y 10% conforme el aumento de la temperatura global (NOAA, 2021). Para la región del Atlántico, se calcula que en promedio tiene 6.2 tormentas al año por lo que muchos arrecifes son impactados frecuentemente (Taylor & Alfaro, 2005). Los huracanes de alta intensidad ocasionan un declive abrupto de la cobertura de coral vivo, entre 15% hasta 60% (Gardner et al., 2005), donde los sitios afectados no muestran una recuperación de la cobertura hasta 8 años después (Gardner et al., 2005), periodo promedio de retorno de un huracán de alta intensidad. Además de la cobertura de coral, los huracanes han afectado la complejidad arrecifal, se estima que los arrecifes han perdido entre 3% y 17% de su rugosidad debido al impacto de un solo huracán (Álvarez-Filip et al., 2011a). En especial la zona Norte del Caribe Mexicano se considera una zona como una zona de alta frecuencia de huracanes categoría 1-5 (Chollett et al., 2012). Cabe destacar que los efectos de estos fenómenos naturales varían de acuerdo a su intensidad, ya que un huracán categoría 5 puede causar diez veces más daño que un huracán categoría 1 (Álvarez-Filip, et al., 2021). De igual manera los huracanes de categoría mayor a 3, son los que causan un mayor daño en la cobertura de coral, ya que pueden reducirla hasta en un 50% abarcando grandes áreas (Álvarez-Filip, et al., 2021).

A pesar de que los arrecifes coralinos, son ecosistemas adaptados a las perturbaciones generadas por los huracanes, inclusive algunas especies de corales ramificados se ven favorecidos por esto al fragmentarse y así propiciar su dispersión vegetativa (Nyström et al. 2000). El nivel de afectación de un huracán sobre un arrecife está ampliamente relacionado con la cobertura de coral inicial del sitio, la exposición del sitio (barlovento o sotavento) y la máxima velocidad de viento del huracán al impacto (Pérez-Cervantes et. al., 2020).

Las crecientes presiones a las que se enfrentan como el cambio climático, las enfermedades y el desarrollo costero, disminuyen su resiliencia a las perturbaciones naturales (Nyström et al. 2000). Por lo cual pueden traer graves consecuencias para los ecosistemas coralinos.

Durante el mes de octubre de 2020, tres huracanes afectaron la costa norte de Quintana Roo (Fig. 1). El huracán Gamma tocó tierra a las 11:45 horas del día 3 de octubre, a 5 km al sur de la población de Tulum, Quintana Roo con vientos de 120 km/h (Latto, 2021). Al tocar tierra el huracán se debilitó rápidamente a tormenta tropical y continuó su trayecto sobre territorio de Quintana Roo y Yucatán, salió al golfo de México, donde su orientación fue nor-noreste-sur-suroeste en sentido horario, regresando a la costa y entrando a territorio de Yucatán, donde se disipó, aproximadamente a las 13:00 horas del 6 de octubre (Bravo-Lujano, 2020).

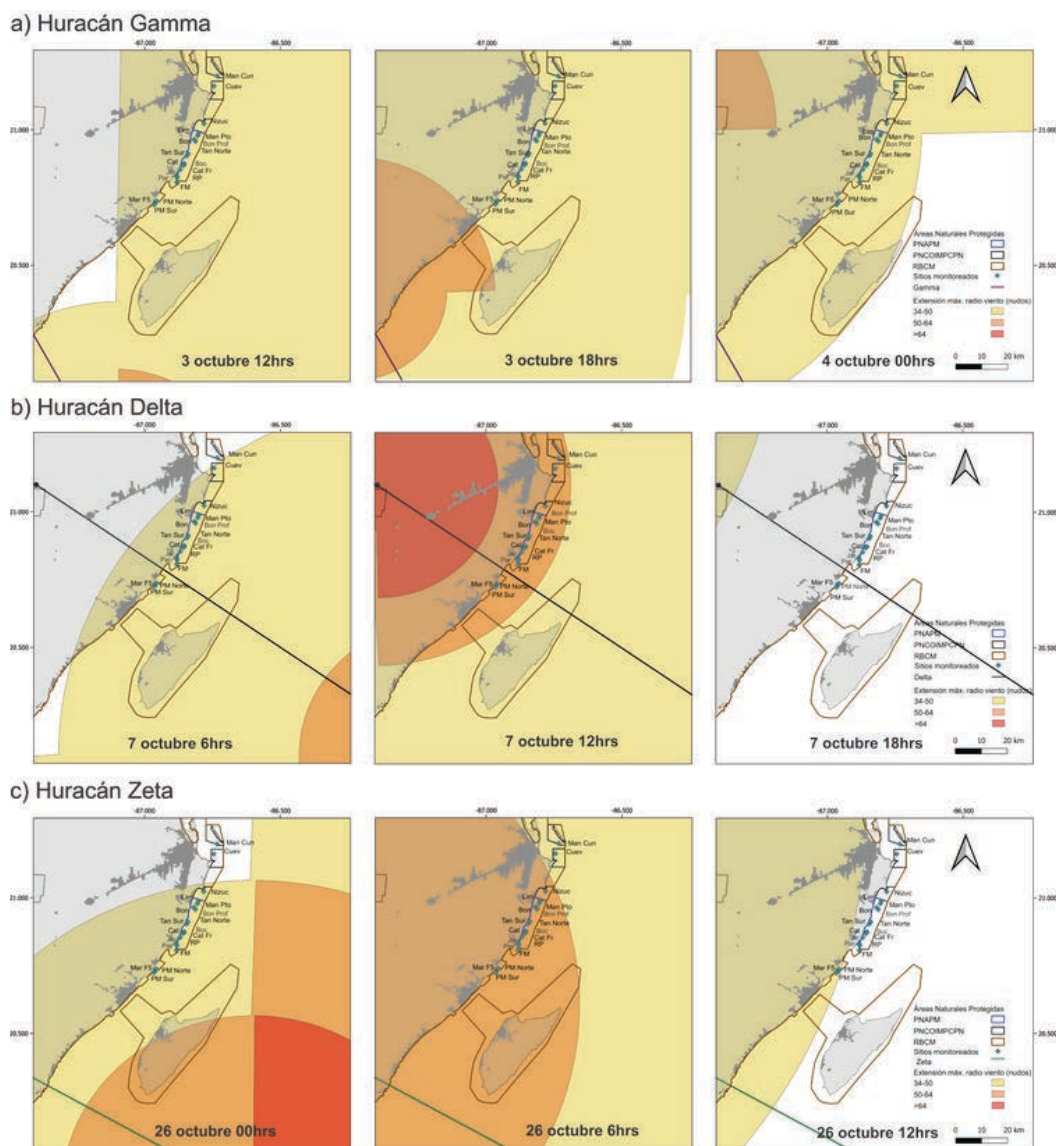


Figura 1. Trayectoria de los huracanes a) Gamma, b) Delta y c) Zeta que afectaron los arrecifes del norte de Quintana Roo en octubre de 2020. Los *tracks* de cada huracán, así como los radios máximos de vientos fueron obtenidos de la NOAA:

<https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2020&basin=atl>.

El huracán Delta entró en la madrugada del 7 de octubre de 2020 por las costas del norte de Quintana Roo con vientos de 166 km por hora y categoría 2 en la escala de huracanes de Saffir-Simpson. (Cangialosi and Berg, 2021). Mientras se desplazaba hacia el noroeste sobre territorio de Quintana Roo y Yucatán, “Delta” estuvo disminuyendo su fuerza como huracán de categoría 2, debido a la falta de la energía que obtenía del mar y a la fricción con el terreno. A las 7:00 horas, se ubicó a 9 km al este de Kantunilkín, Quintana Roo con vientos máximos sostenidos de 165 km/h y rachas de 205 km/h, misma fuerza con la que aproximadamente a las 11:00 horas, salió al mar a 30 km al oeste de Río Lagartos, Yuc (Bravo-Lujano, 2020b).


El Huracán Zeta fue el último en pasar por las costas quintanarroenses la noche del 26 de octubre, el centro del ciclón tropical ingresó a tierra en las inmediaciones de Ciudad Chemuyil y a 15 km al nor-noreste de Tulum, como huracán de categoría 1, con vientos máximos sostenidos de 130 km/h, rachas de 155 km/h y desplazamiento hacia el noroeste a razón de 20 km/h (Marcelo-Domínguez, 2020).

El presente estudio tiene como objetivo medir el efecto de los huracanes: Gamma, Delta y Zeta sobre arrecifes del norte de Quintana Roo. Para lo cual, se utilizaron dos aproximaciones complementarias. Primero, se realizó una comparación de la integridad de los arrecifes antes y después del paso de los huracanes (Tabla 1; Fig. 2). Para esto, se identificaron sitios con información de cobertura coralina y rugosidad previo al paso de los huracanes (entre los años 2016 a 2019), y fueron contrastados datos obtenidos en monitoreos de campo realizados posterior al paso de los huracanes (obtenidos entre noviembre de 2020 y julio de 2021). Además, en los monitoreos posteriores al paso de los huracanes también se cuantificó el número de colonias de coral que presentaban evidencia de afectación por los huracanes, ya que se encontraron rotas, o volteadas; así como el número de fragmentos. Para el sitio Limones se consideró que hubo una restauración por parte de las Brigadas de Contingencia Ambiental del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos, donde rescataron y estabilizaron colonias y fragmentos de *Acropora palmata* durante octubre a diciembre de 2020 (Gallegos-Aguilar, 2021).

La segunda aproximación, a una escala espacial más fina y con mucha mejor resolución, consistió en generar ortomosaicos con fotos aéreas tomadas con un dron comercial del arrecife “Limones” ubicado al norte de Puerto Morelos. Los vuelos de dron fueron realizados en agosto de 2020 (previo a los huracanes) y el 16 de octubre de 2020, posterior al impacto de los huracanes Gamma y Delta. Dentro de los ortomosaicos se delimitaron todas las colonias y parches de *A. palmata* mayores a 1.5 m² en cada uno de los periodos; y mediante un análisis espacial se identificaron las alteraciones en la extensión de colonias y parches, y su condición para evaluar el daño producto de los huracanes.



2



METODOLOGÍA

2

METODOLOGÍA

Durante noviembre de 2020 hasta julio de 2021, se realizaron monitoreos para evaluar la cobertura de coral, rugosidad y comunidad coralina de 19 sitios debido al paso del huracán Gama, Delta Zeta. Estos sitios fueron elegidos con base a la información previa de cobertura de coral y rugosidad que se tuviera, tres de los sitios se encuentran en el Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, 16 sitios en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y dos dentro de la Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano (Tabla 1, Fig. 2). La metodología utilizada para la cobertura de coral y rugosidad fue con base en el método utilizado en el monitoreo previo al huracán.

Cabe destacar que la información sobre cobertura coralina y rugosidad previa a los huracanes fue obtenida del Sistema de Información de Arrecifes Coralinos (SIAC) del Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, UNAM. De igual manera, los datos obtenidos del monitoreo de colonias se incorporaron al SIAC el cual ya tiene un formato estandarizado para el procesamiento de datos, a partir del cual se podrían utilizar los datos para su posterior análisis.

2.1 Área de estudio

2.1.1 Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc

El Parque Marino Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCPN) fue decretado el 19 de julio de 1996, se localiza al noreste de Quintana Roo y queda comprendido dentro de las aguas marinas costeras del Mar Caribe, con una superficie total de 8,673 hectáreas, en los municipios de Isla Mujeres y Benito Juárez, teniendo un total de tres polígonos, donde cada uno posee una zona o área arrecifal (SEMARNAT, 2016). Si bien los arrecifes del PNCOIMPCPN están clasificados como arrecifes bordeantes o costeros, la parte frontal está desarrollada en parches y en algunos casos se encuentran macizos y canales muy pequeños dominados por gorgonáceos (SEMARNAT, 2016). Dado que el arrecife presente en el parque no es continuo, no presenta bocas de salida (Núñez-Lara et al., 2015).

2.1.2 Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) es un área natural protegida (ANP), decretada el 2 de febrero de 1998 que cubre 9,066.63 ha y se ubica al noreste del estado de Quintana Roo, en la Península de Yucatán, México (Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, 2000). El área tiene un clima cálido subhúmedo, con lluvias que se filtran a través del sustrato kárstico en una extensa red de aguas subterráneas que descargan al mar a través de fisuras. La economía en Puerto Morelos se sustenta predominantemente en el turismo, incluido el buceo y los tours de snorkel al arrecife. La pesca es otra actividad económica importante, donde existen concesiones para la extracción, captura y uso comercial de langosta, especies de peces óseos y tiburones.

2.1.3 Reserva de la Biosfera del Caribe Mexicano

La reserva de la Biosfera del Caribe Mexicano (RBCM) es la ANP más grande del estado de Quintana Roo, ubicada en el margen oriental de la Península de Yucatán, cuenta con una superficie total de 28,589.49 ha, de la cual 99% corresponde a la porción marina. Dentro de la porción marina predominan praderas de pastos marinos, fondos arenosos y arrecifes de coral que se extiende a lo largo de la costa, desde Isla Contoy, al norte de Quintana Roo, hasta Xcalak en el sur de Quintana Roo. La ANP fue decretada el 7 de diciembre del 2016, por lo que es la ANP más reciente de la región y colinda con las ANPs de PNAPM y PNCOIMPCPN.



Tabla 1. Sitios con datos de cobertura de coral antes del impacto del huracán Delta ordenados de sur a norte.

Sitios	Código	Latitud	Longitud	ANP	Zona arrecifal	Prof. (m)
Punta Maroma Sur	PM Sur	20.72349	-86.96177	RBCM	Frontal	10
Maroma Frontal	Mar F5	20.727642	-86.95971	RBCM	Frontal	5
Punta Maroma Norte	PM Norte	20.73731	-86.95178	NA	Frontal	10
Fish Market	FM	20.80638	-86.87861	NA	Frontal	9
La Pared	Par	20.824231	-86.87619	PNAPM	Posterior	5
Jardines	Jar	20.831355	-86.8802	PNAPM	Posterior	4
Radio Pirata	RP	20.853418	-86.86522	PNAPM	Posterior	1.5
La Catedral Posterior	Cat	20.8688	-86.85465	PNAPM	Posterior	2
La Catedral 5m	Cat Fr	20.871389	-86.85056	PNAPM	Frontal	5
La Bocana	Boc	20.874838	-86.85052	PNAPM	Posterior	5
Tanchacte Sur	Tan Sur	20.903943	-86.84141	PNAPM	Posterior	1.5
Tanchacte Norte	Tan Norte	20.911926	-86.83608	PNAPM	Posterior	3
Bonanza	Bon	20.964699	-86.81408	PNAPM	Posterior	1.5
Bonanza Profundo	Bon Prof	20.9575	-86.80849	PNAPM	Frontal	9
Manchones Norte	Man Pto	20.97855	-86.80063	PNAPM	Frontal	10
Limonas	Lim	20.988452	-86.79719	PNAPM	Posterior	1.5
Nizuc C3	Nizuc	21.022797	-86.77714	PNCOIMPCPN	Posterior	1.5
Cuevones	Cuev	21.1616	-86.7406	PNCOIMPCPN	Frontal	5
Manchones	Man Cun	21.20016	-86.7289	PNCOIMPCPN	Frontal	5

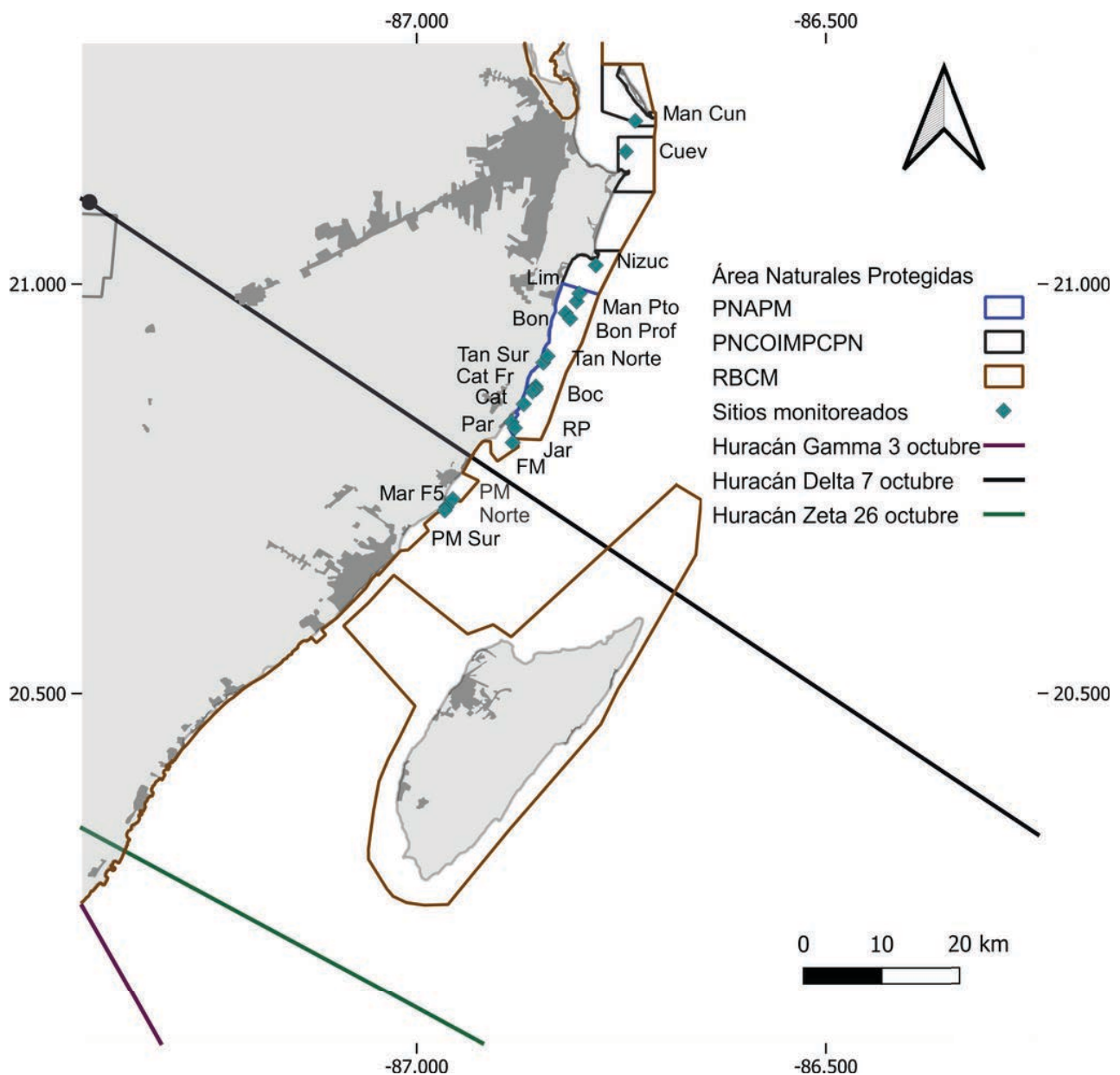


Figura 2. Mapa de sitios monitoreados para la evaluación del efecto de los huracanes Gamma (3 de octubre de 2020), Delta (7 de octubre de 2020) y Zeta (26 de octubre de 2020) en los arrecifes del norte de Quintana Roo.

2.2 Indicadores de cambio para determinar el daño

Para todos los sitios las comparaciones antes y después del paso del huracán se efectuaron utilizando indicadores, ampliamente utilizados en la literatura por ser susceptibles después del paso de un huracán (Gardner, 2005; Lirman and Fong, 1997b 1997a).

1) Cambios en la cobertura total de coral: esto engloba a todas las especies de coral.

- 2)** Cambios en la cobertura de *Acropora palmata*: el coral cuerno de alce es una especie emblemática del Caribe Mexicano, la cual ha experimentado fuertes declives en su cobertura, por lo cual es de suma importancia evaluar los efectos que los huracanes tienen sobre esta especie.
- 3)** Cambios en la cobertura del género *Acropora spp.*: este grupo engloba a las especies *A. palmata*, *A. cervicornis* y *A. prolifera*.
- 4)** Cambios en la cobertura de especies frágiles: debido a los fuertes vientos y oleaje que los huracanes pueden generar, se decidió agrupar aquí a las especies de coral susceptibles al rompimiento por el impacto físico producido por los huracanes representadas por las especies de *Acropora spp.*, *Agaricia tenuifolia*, *Porites porites*, *P. divaricata*, *P. furcata* y *Millepora complanata*.
- 5)** Rugosidad del arrecife.

Estos cinco indicadores son presentados a nivel de sitio y como promedio englobando los 19 sitios. De igual forma en cada sitio se registró mediante fotografías los daños realizados por los huracanes (Apéndice 1). Para comparar las diferencias significativas entre el antes y después del pasó de los huracanes se utilizó la prueba de T.

2.3 Métodos para colecta de datos de cobertura de coral y rugosidad

2.3.1 Punto de intersección

Para nueve sitios se utilizó el método de punto de intersección basado en la metodología AGRRA V5 (Lang et al., 2012). Para esto se utilizaron ocho transectos de 10 m de longitud para cada uno de los sitios monitoreados. Cada 10 cm se registró la naturaleza del organismo sésil que estuviera directamente debajo de ese punto. Los organismos y tipo de fondo fueron clasificados en:

- | | |
|--|--|
| 1. Corales escleractínios a nivel de especie, | 8. Cianobacterias, |
| 2. Hidrocorales, | 9. Pasto marino, |
| 3. Octocorales, | 10. Arena, |
| 4. Macroalgas, | 11. Coral muerto, |
| 5. Macroalgas calcáreas, | 12. Tunicados |
| 6. Algas coralinas calcáreas, | 13. Otros invertebrados bentónicos. |
| 7. Tapete algal, | |

A partir de estos datos se obtuvieron los porcentajes de cobertura de los componentes más importantes del sustrato. Para obtener el porcentaje de cada grupo se utilizó la siguiente fórmula: Cobertura = (# de puntos del organismo *100) / 100

2.3.2 Índice de rugosidad

La complejidad estructural del arrecife se cuantificó mediante el índice de rugosidad (Risk, 1972; Alvarez-Filip et al., 2011), que se obtuvo ajustando una cadena fina de 30 m (0,7 cm de longitud de eslabón) al arrecife, tomando como referencia el transecto de punto de intersección de 10 m. Al colocar la cadena, se tuvo cuidado de seguir el contorno detallado de los corales y otros atributos del arrecife (grietas en las rocas, esponjas) alineando las ramas individuales y colocando la cadena entre las ramas de los corales. Para calcular el índice, la distancia contorneada se dividió por la distancia lineal entre su punto inicial y final. Una superficie perfectamente plana tiene un índice de rugosidad de uno, mientras que los números más grandes indican superficies más complejas.



2.3.3 Línea de intersección

Este método emplea una versión modificada del método estándar “línea intercepto” (Canfield 1941). Se registró la cobertura observada cada centímetro (1 cm) del contorno del sustrato, para lo cual se utilizó una segunda cinta métrica flexible (“cinta-contorno”) que se acomodó directamente sobre el sustrato; la información registrada cada “centímetro-contorno” se delimitó cada “metro-maestro” (de los 10 m fijos entre cada estaca), por lo tanto, al final de cada transecto se obtuvieron 10 grupos de información del bentos correspondiente a cada metro-recto. En cada transecto se registró la cobertura de:

- | | |
|---|--|
| 1. Corales a nivel de especie, | 5. Algas calcáreas (e.g. Halimeda spp.), |
| 2. Algas coralinas incrustantes, | 6. Tunicados, |
| 3. Otros organismos calcáreos incrustantes, | 7. Esponjas, |
| 4. Tapetes algales, macro algas (pardas, verdes y rojas), | 8. Sedimento, |
| | 9. Pedacería. |

También se midió la “distancia-contorno” cubierta por cada componente bentónico bajo la “cinta- maestra”. Así como la “distancia-contorno” alcanzada dentro de los 10 m. El cociente de estos valores permitió estimar la rugosidad. Esta metodología fue utilizada en 10 sitios.

De igual forma en cada sitio se registró mediante fotografías los daños realizados por los huracanes (Apéndice 1).

2.3.4 Indicadores de la condición de la comunidad coralina

Para evaluar la incidencia y afectación de los huracanes en las colonias coralinas se utilizaron transectos de banda de 10x1 m donde se tomaron en cuenta todas las colonias mayores a 4 cm que se encuentren dentro de la banda. En cada sitio se registraron los siguientes datos para cada colonia de acuerdo con la metodología del Atlantic Gulf Rapid Reef Assessment versión 5.5 (AGRRA) de la sección de corales (Lang et al., 2012):

a) Especie de coral, se registra el código de la especie con cuatro letras, con la primera letra del género y las tres primeras letras de la especie (e.j. APAL, para *Acropora palmata*).

b) El diámetro máximo proyectado (áreas vivas + muertas) a vista de plano, el diámetro menor (perpendicular al diámetro máximo, incluyendo el área viva y muerta) y su altura máxima (áreas vivas + muertas) de la base del sustrato de la colonia (no de la base del arrecife). El diámetro debe ser medido perpendicularmente al eje de crecimiento.

c) El porcentaje (%) del coral que ha muerto recientemente y el % de la mortalidad antigua, visto desde arriba en vista “en plano”.

d) Tomar nota del % de blanqueamiento presente en la colonia. Este se caracteriza de acuerdo con la severidad aproximada del blanqueamiento:

- Pálido: pérdida de color del tejido del coral (P),
- Blanqueamiento parcial: parches de tejido totalmente decolorado o blanco,
- Blanqueado: el tejido está totalmente blanco, no simbionte visible (BL).

e) Tomar nota de cualquier enfermedad presente en el tejido y el % de mortalidad atribuible a dicha enfermedad. Las categorías de enfermedades de coral que serán utilizadas son:

- Síndrome Blanco,
- Enfermedad de la Banda Negra (BBD),
- Enfermedad de la Plaga Blanca (WBD) Tipo I y II (solo acropóridos),
- Plaga Blanca (WP),
- Enfermedad de Banda Amarilla (YBD),
- Enfermedad de los Círculos Negros I y II (DS-I, DS-II) y
- Enfermedad de la Banda Roja (RBD).

f) Sobrecrecimiento. Se identificará el sobrecrecimiento de algún individuo de otra especie como esponjas, octocorales, tunicados, entre otros y se estimará el porcentaje afectando el coral.

g) Si las colonias se encontraban:

- Volteadas: Colonias que fueron cambiadas de posición por el huracán, que no comprometen su supervivencia (ver apéndice 1).
- Rotas: Colonias con signos de que el huracán rompió parte de su estructura, y se observa la de colonia de color blanco

i) De igual forma se contabilizaron los fragmentos de colonias encontrados a nivel especie y se clasificaron en:

- Libre: Estructura de coral desprendida de la colonia que no se encuentra fija ni restaurada.
- Fijo: El fragmento de manera natural está cimentado en el arrecife.
- Restaurado: Fragmento que se encuentra pegado con cemento o apuntalados al arrecife.



2.4 Metodología para procesar los datos del ortomosaico

2.4.1 Ortomosaico

Se realizaron dos ortomosaicos con imágenes aéreas tomadas con un dron comercial, modelo Mavic Pro, el día 4 de agosto (previo a los eventos ciclónicos) y el 16 de octubre (posterior a los huracanes Gama y Delta). Las imágenes fueron tomadas con planes de vuelo a 100, 50 y 25 metros de altura, abarcando un área de 23.5 hectáreas para los vuelos del 4 de agosto y 26.2 hectáreas, esto mediante el software PIX4D Fly (Tabla 2). Para la generación del ortomosaico se utilizó el software PIX4D Mapper, utilizando la máxima resolución de las fotos, el sistema de coordenadas se estableció en UTM/WGS 84 Zona 16, por lo que las unidades del ortomosaico fueron definidas en metros. Las opciones del procesamiento del ortomosaico fueron definidas como Mapa 3D Standard, con un mínimo de dos fotos por match y la densidad de puntos se estableció en nivel Óptimo (Fig. 3 y 4).

Tabla 2. Características de las imágenes utilizadas para los ortomosaicos y su extensión.

	Altura de vuelos msnm	25	50	100	Total
4 de agosto 2020	Imágenes	364	369	315	1048
	Área (Ha)				23.57
16 de octubre 2020	Imágenes	283	373	369	1022
	Área (Ha)				26.2

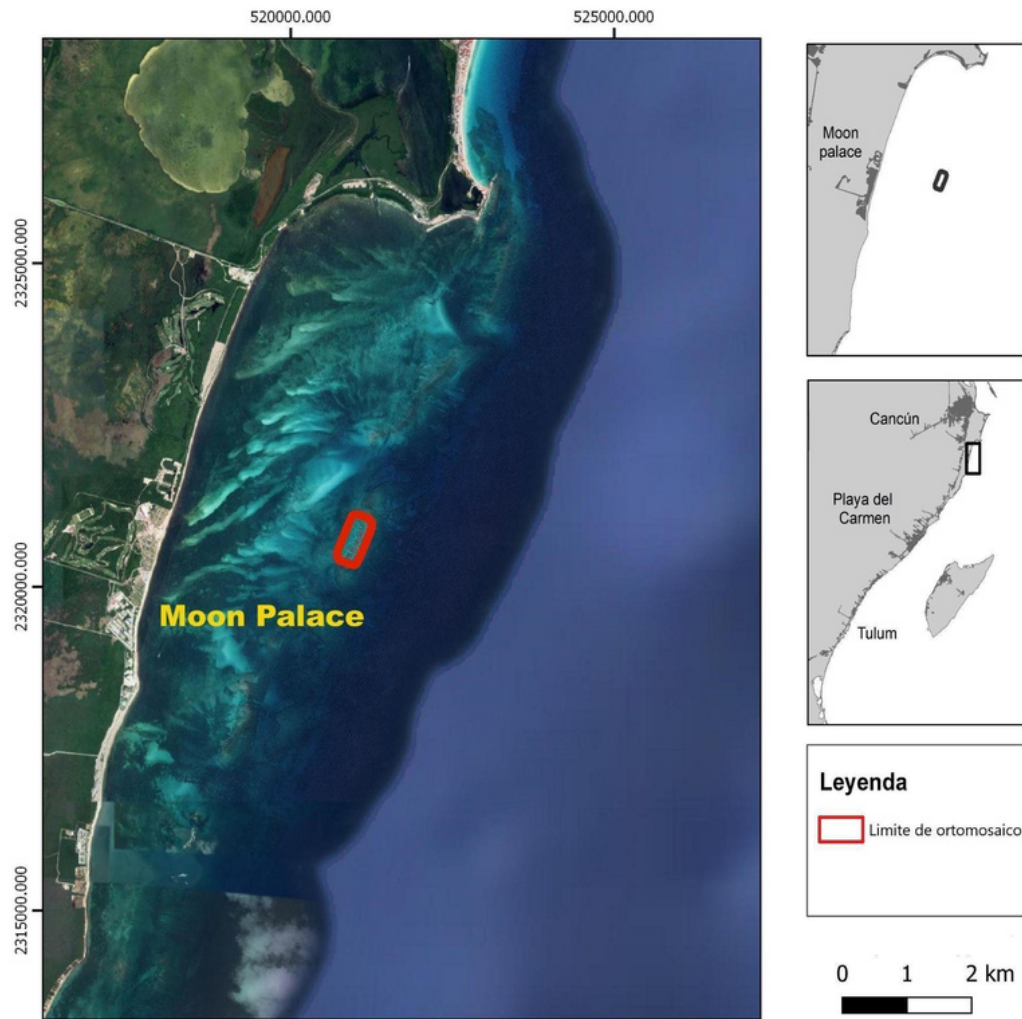


Figura 3. Ubicación de los límites de los ortomosaicos en el Arrecife Limones. Sistema de coordenadas UTM/WGS 84 Zona 16.

Debido a la gran extensión de los ortomosaicos y al margen de error asociado al GPS del dron (~1.5 m) se procedió a la alineación de estos. Para lo cual, se utilizó como base el ortomosaico del 4 de agosto, para posteriormente fraccionar el ortomosaico del 16 de octubre en cuatro secciones de menor tamaño (Fig. 4). Cada una de las secciones generadas fue alineada, respecto al ortomosaico del 4 de agosto, utilizando y marcando referencias visuales presentes en ambos ortomosaicos como colonias del coral *Pseudodiploria strigosa*. Una vez obtenidos y marcadas las referencias visuales, se utilizó el georreferenciador del programa ArcMap 10.4 para la alineación de cada una de las secciones.

Cabe señalar, que la densidad de fotos, así como la resolución asociada a la altura que fueron tomadas las fotos, no es homogénea dentro de los ortomosaicos ya que los planes de vuelo de 50 y 25 metros se encuentran concentrados en la zona central de los ortomosaicos (Sección 2 y 3; Fig. 4), por lo tanto, en los extremos del ortomosaico el error asociado a la imagen podría ser mayor. Con base en esto, se procedió a medir el efecto de la diferencia de resoluciones entre ortomosaicos, así como entre secciones antes mencionadas.

Para lo cual se seleccionaron 16 colonias de *Pseudodiploria strigosa*, distribuidas en diferentes secciones de los ortomosaicos, a las cuales se les midió el área y el perímetro en ambas temporalidades para calcular su fluctuación, asumiendo como error la diferencias entre áreas de las colonias de *P. strigosa* tomadas en ambas temporalidades. Obteniendo, que la diferencia entre áreas utilizadas como parámetro para medir el error asociado a la calidad de los ortomosaicos es de 0.10 m^2 ($\pm 0.01 \text{ E.E.}$). Asimismo, al comparar el error entre secciones de los ortomosaicos, se encontró que los extremos de estos (sección 1 y 2), presentan mayores promedios de diferencia entre áreas 0.12 m^2 , que en las secciones centrales ambas con 0.8 m^2 (Tabla 3).

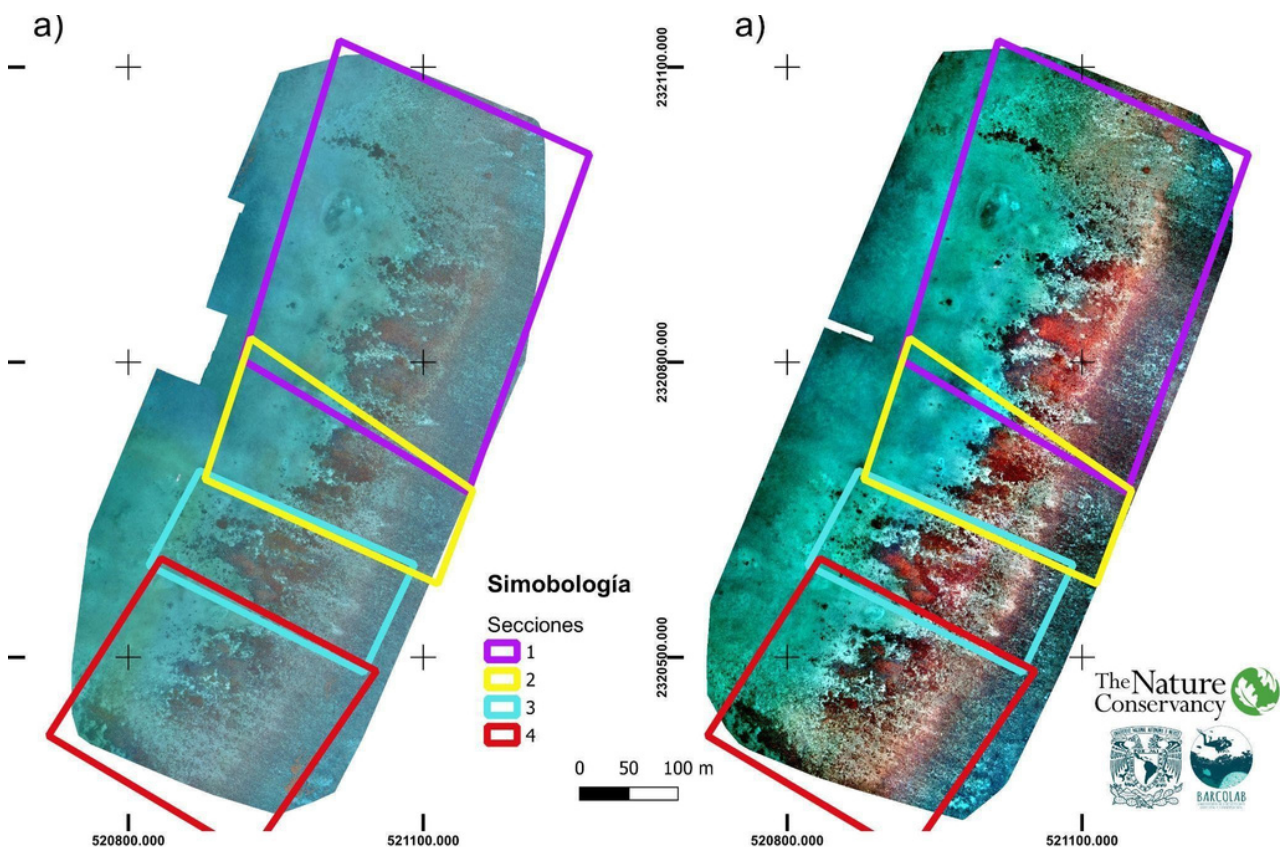


Figura 4. Ortomosaicos del arrecife Limones. A) Ortomosaico realizado el 4 de agosto. B) Ortomosaico realizado el 16 de octubre. Los recuadros de colores representan, cada una de las secciones en las que fue seccionado el mosaico del 16 de octubre.

Tabla 3. Error asociado a las diferencias de resolución entre secciones del ortomosaico. El error entre mosaicos se establece como la diferencia entre las áreas medidas en ambas temporalidades. Se muestran los valores promedio de las diferencias entre mediciones en ambas temporalidades, así como el número de colonias utilizadas y el error estándar.

Sección	Diferencia de área (m ²)	No. de colonias	Error estándar
1	0.12	3	0.071
2	0.08	3	0.049
3	0.08	3	0.046
4	0.12	6	0.047

2.5 Delimitación de parches de *Acropora palmata*

Una vez generados los ortomosaicos se procedió a dibujar a mano alzada el área que ocupaban los parches y colonias de alrededor de 1.5 m² en el ortomosaico del 4 de agosto, esto mediante la creación de polígonos vectoriales (shapefile), utilizando la herramienta de “añadir polígono”, todo esto se realizó con especial cuidado para diferenciar entre arenales y canales que se encontraban entre las colonias y parches, esto con el fin de tener el mayor margen de confianza en las áreas (Fig. 5a y b). Asimismo, se utilizaron cambios en las bandas de color RGB (Red, Green and Blue) de los ortomosaicos para acentuar las diferencias de los parches y colonias vivos de los que se encontraban muertos. Ya obtenido este archivo vectorial, se calculó el área y su perímetro para cada parche y colonia, así como también se le asignó un identificador (ID). Utilizando como base el archivo vectorial de los parches y colonias del 4 de agosto, se hicieron las modificaciones a los polígonos en el ortomosaico del 16 de octubre, siguiendo los márgenes de daño aparente, teniendo como premisa de trabajo que todo cambio en el área, perímetro o forma de los parches y colonias es prueba de daño físico producido por la acción de los huracanes Gama y Delta, así mismo toda colonia o parche que no se encontraba en el sitio donde fue ubicada el 4 de agosto, era considerada como pérdida total, esto debido a que pese a que se encontraron señales de fragmentos similares a la colonia en cuestión, no es posible asegurar que sea la misma que se registró previo a los huracanes (Fig. 5c y d). Para cuantificar los daños en los parches y colonias se utilizó la herramienta de “Diferencia” vectorial, para contrastar las áreas antes y después de los huracanes (Fig. 5e).

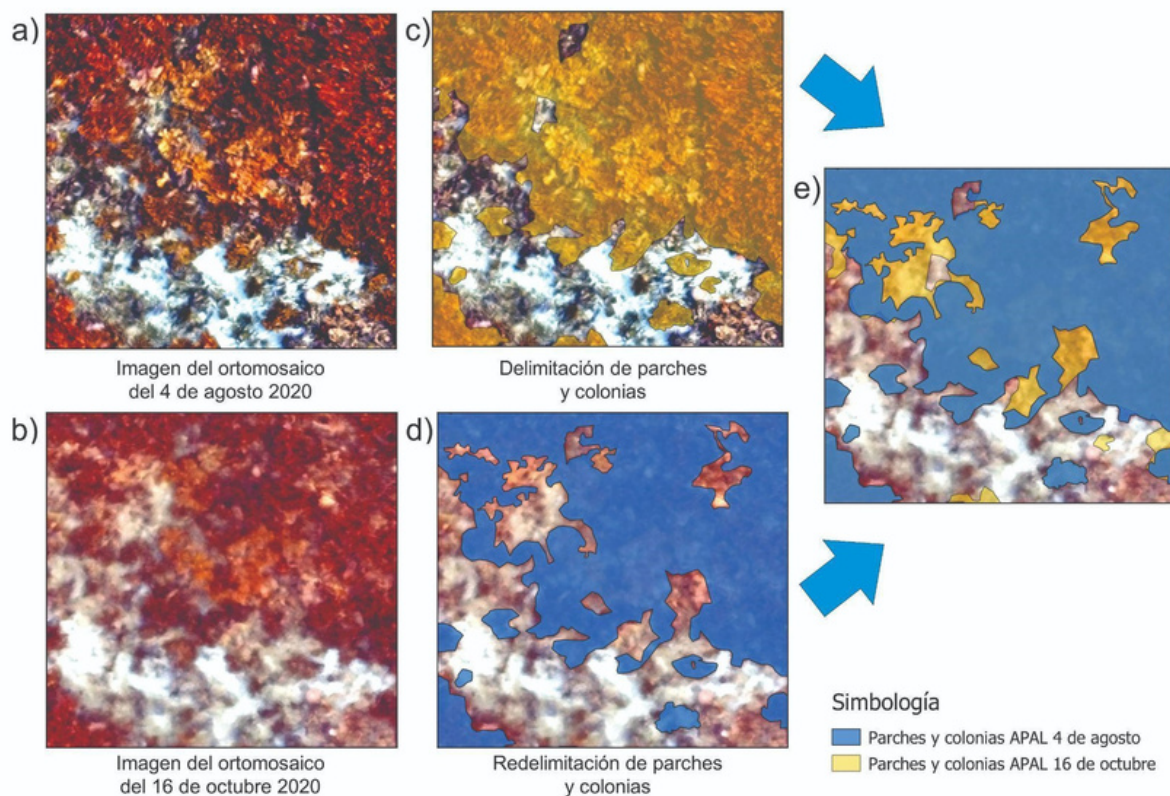


Figura 5. Delimitación de los parches y colonias de *A. palmata* y la determinación del cambio. a) Sección del ortomosaico del 4 de agosto (previo a los huracanes Gama y Delta). b) Delimitación del área de las colonias y parches, mediante la herramienta “Añadir polígono”. c) Sección del ortomosaico del 16 de octubre (posterior a los huracanes Gama y Delta). d) Delimitación del área de las parches y colonias, tomando como referencia los polígonos generados para el ortomosaico del 4 de agosto. e) Área dañada, contraste entre el área inicial y final de los parches y colonias de *A. palmata*.

3



RESULTADOS

3

RESULTADOS

3.1 Cambios en los indicadores de cobertura

En total se realizó el monitoreo para 19 sitios, del total de sitios realizados en el 84% de ellos no se identificaron cambios, en ninguno de los cinco indicadores utilizados, descritos en la metodología, (Fig. 6a-e). A nivel de un promedio total, incluyendo los 19 sitios, no se encontraron diferencias antes y después del paso de los huracanes en ninguno de los cinco indicadores utilizados (Fig. 6f-j).

Cambios en la cobertura de todas las especies.

Antes del paso de los huracanes, el valor mínimo de cobertura de coral total se encontraba en el sitio la “Catedral 5m” con $5.6 \pm 0.8\%$ (promedio \pm error estándar) mientras que la máxima fue en Limones con $50 \pm 7.5\%$. Después del paso de los huracanes, el sitio de Fish Market tuvo la cobertura más baja con $3.6 \pm 1.1\%$, mientras que Limones sigue siendo el sitio con mayor cobertura de coral con 46.1 ± 5.5 (Fig. 6a, Tabla 3). Los sitios Bonanza Profundo y Manchones Puerto presentaron un declive significativo en su cobertura, el cual es atribuible a la enfermedad del Síndrome Blanco, ya que estos sitios se caracterizan por tener una alta cobertura de especies masivas, las cuales fueron altamente susceptibles a esta enfermedad.



Cambios en la cobertura del género Acropora

De los 11 sitios que cuentan con cobertura de *A. palmata*, ninguno presentó un declive significativo en su cobertura (Fig. 6b, Tabla). Al analizar los cambios del género *Acropora*, observamos que el arrecife Manchones Puerto tuvo una disminución en esta cobertura , pasando de 9.5 ± 3.6 a $0.6 \pm 0.4\%$ (Fig. 6c, Tabla 3). Esto probablemente se debió a la pérdida de *A. cervicornis*, la cual se vio severamente afectada durante 2018-2019, debido a la enfermedad del Síndrome Blanco, los datos se pudieron comparar gracias a los datos registrados en el SIAC.

Cambios en la cobertura de especies frágiles.

Las especies frágiles se definieron como aquellas cuyas colonias fueran susceptibles a romperse a causa del efecto de una tormenta o huracán, agrupando a las especies del género *Acropora*, *Millepora*, *Porites porites*, *P. divaricata*, *P. furcata* y *Agaricia tenuifolia*. Solo Manchones Norte presentó un declive significativo en la cobertura de especies frágiles de $16.3 \pm 4.4\%$ a $1.2 \pm .07\%$, mientras que Tanchacté Norte presentó un aumento significativo de 0.1 ± 0.0 a 4.0 ± 1.3 . Este aumento pudo ser causado a que los transectos fueron puestos en distinta posición, teniendo así una mayor cobertura de *A. palmata* (Fig. 6d, Tabla 3). De igual forma Punta Maroma Sur presentó un declive en la cobertura atribuible tanto a la enfermedad del Síndrome Blanco, como al daño ocasionado por los huracanes en las colonias de *Agaricia tenuifolia*.

Cambios en la rugosidad

En cuanto a la rugosidad, los sitios no presentaron disminuciones significativas; solo el sitio Nizuc presentó un incremento significativo en su rugosidad (Fig. 6e, Tabla 4). Esto posiblemente debido al incremento de fragmentos de *A. palmata* registrados, así como en la reconfiguración de las colonias al estar volteadas o movidas. A nivel de promedio total, incluyendo los 19 sitios, no se registraron diferencias significativas antes y después del paso de los huracanes (Fig. 6f-j, Tabla 4).



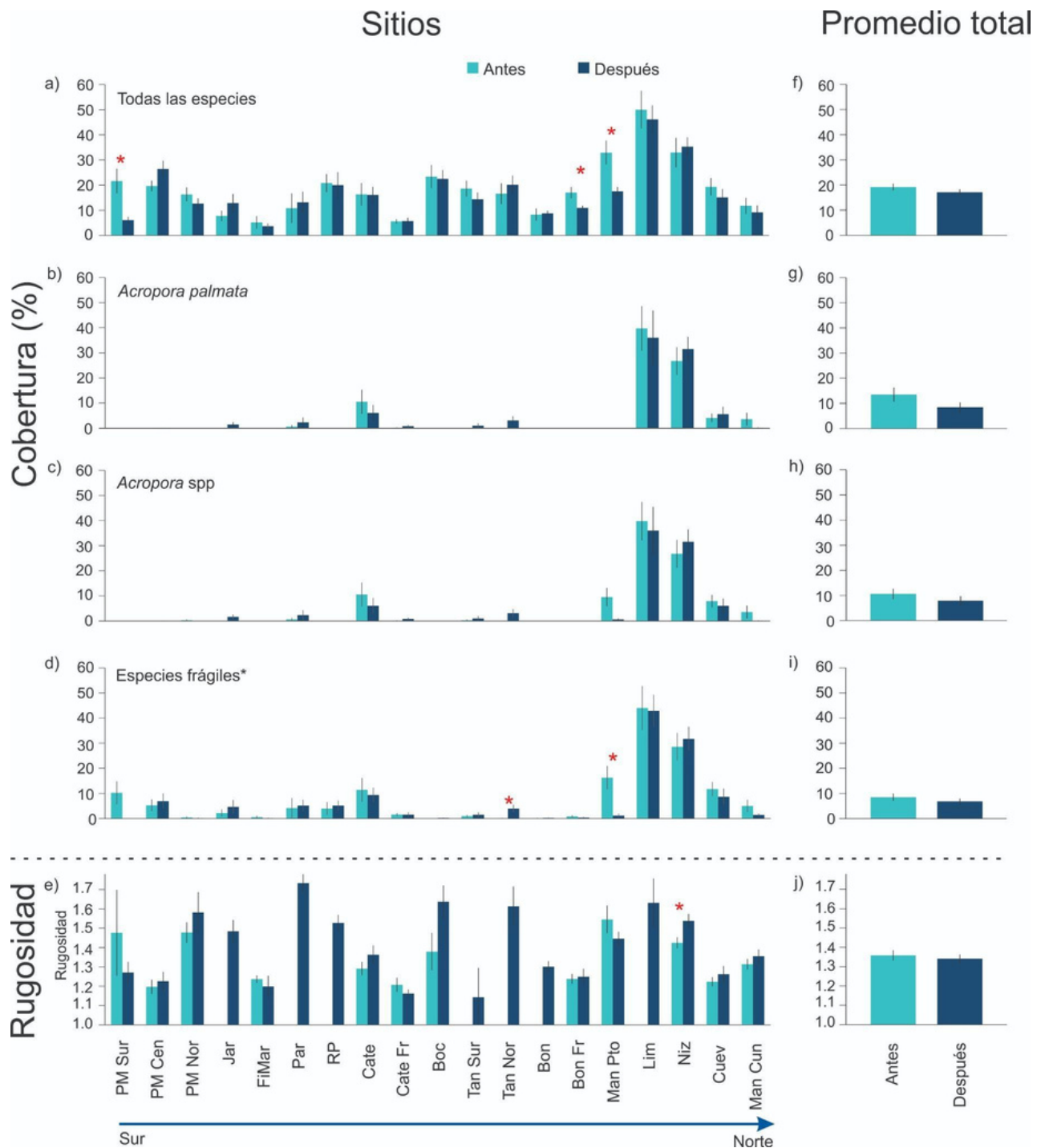


Figura 6. Cobertura de coral y rugosidad para los arrecifes del norte de Quintana Roo antes y después del paso de los huracanes. a) Cobertura de coral total para cada sitio, b) cobertura de *Acropora palmata*, c) Cobertura del género *Acropora*, d) Cobertura de especies frágiles (i.e. *Acropora spp*, *Millepora spp.*, *Porites porites*, *Porites furcata*, *Porites divaricata* y *Agaricia tenuifolia*), e) Rugosidad para cada sitio y f)-j) son las coberturas por grupo y rugosidad promedio, incluyendo los 19 sitios. Los asteriscos rojos (*) indican diferencias significativas entre antes y después del paso de los huracanes. Las barras de error representan el error estándar.

Tabla 4. Cobertura de coral y rugosidad para los arrecifes del norte de Quintana Roo antes y después del paso de los huracanes (promedio \pm desviación estándar). CCT= cobertura de coral total, *Apal*= cobertura de *Acropora palmata*, *Acro*= cobertura del género *Acropora*, E. frágiles= Cobertura de especies frágiles (i.e. *Acropora spp*, *Millepora spp.*, *Porites porites*, *Porites furcata*, *Porites divaricata* y *Agaricia tenuifolia*, Rug.= rugosidad.

Sitios	CCT Antes	CCT Después	Apal Antes	Apal Después	Acro Antes	Acro Después	E. frágiles Antes	E. frágiles Después	Rug. Antes	Rug. Después
Punta Maroma Sur	21.6 \pm 4.9	6 \pm 1.3					10.3 \pm 4.5	0.1 \pm 0.1	1.5 \pm 0.2	1.3 \pm 0.1
Maroma Frontal	19.6 \pm 2.1	26.4 \pm 3.3		0.1 \pm 0.1		0.1 \pm 0.1	5.3 \pm 2.3	7 \pm 3	1.2 \pm 0.03	1.2 \pm 0.04
Punta Maroma Norte	16.3 \pm 2.8	12.6 \pm 2.1			0.32 \pm 0.3		0.4 \pm 0.3	0.2 \pm 0.2	1.5 \pm 0.1	1.6 \pm 0.1
Jardines	7.8 \pm 2.1	12.8 \pm 3.6		1.5 \pm 1		1.7 \pm 0.9	2.3 \pm 1.4	4.7 \pm 2.7		1.5 \pm 0.1
Fish Market	5.2 \pm 2.5	3.7 \pm 1.1					0.6 \pm 0.6	0.2 \pm 0.2	1.2 \pm 0.01	1.2 \pm 0.1
La Pared	10.8 \pm 5.9	13.2 \pm 4.2	0.6 \pm 0.7	2.3 \pm 2	0.7 \pm 0.7	2.3 \pm 2	4.2 \pm 4	5.2 \pm 2.3		1.7 \pm 0.04
Radio Pirata	20.8 \pm 3.6	20 \pm 5.1					4 \pm 2.5	5.2 \pm 2		1.5 \pm 0.04
La Catedral Posterior	16.3 \pm 4.5	16.1 \pm 3.3	10.5 \pm 4.7	6.1 \pm 3.1			11.4 \pm 4.8	9.4 \pm 2.9	1.3 \pm 0.03	1.4 \pm 0.04
La Catedral 5m	5.6 \pm 0.9	5.7 \pm 1.3	0.17 \pm 0.2	0.8 \pm 0.5	0.2 \pm 0.2	0.8 \pm 0.5	1.6 \pm 0.7	1.6 \pm 0.9		1.2 \pm 0.02
La Bocana	23 \pm 4.6	22.5 \pm 3.5						0.3 \pm 0.2	1.4 \pm 0.1	1.6 \pm 0.1
Tanchacte Sur	18.6 \pm 3.2	14.4 \pm 2.7		1 \pm 1	0.4 \pm 0.4	1 \pm 1	1 \pm 0.5	1.5 \pm 1		1.1 \pm 0.2
Tanchacte Norte	16.6 \pm 4.1	20.1 \pm 3.7		3.1 \pm 1.7		3.1 \pm 1.7	0.1 \pm 0.1	4 \pm 1.5		1.6 \pm 0.1
Bonanza	8.3 \pm 2.4	8.8 \pm 1.1					0.1 \pm 0.1	0.3 \pm 0.2		1.3 \pm 0.02
Bonanza Profundo	17 \pm 2.3	11 \pm 0.9					0.9 \pm 0.4	0.4 \pm 0.3	1.2 \pm 0.02	1.2 \pm 0.04
Manchones Norte	32.9 \pm 4.7	17.5 \pm 1.8					16.3 \pm 4.6	1.2 \pm 0.8	1.5 \pm 0.1	1.4 \pm 0.03
Limones	50 \pm 7.5	46.1 \pm 5.6	39.8 \pm 8.9	36 \pm 10.9	39.8 \pm 7.7	36 \pm 9.4	44 \pm 8.7	42.9 \pm 6.4		1.6 \pm 0.1
Nizuc C3	33 \pm 5.9	35.3 \pm 3.7	26.8 \pm 5.5	31.5 \pm 4.9	26.8 \pm 5.5	31.5 \pm 4.9	28.6 \pm 5.5	31.7 \pm 4.8	1.4 \pm 0.02	1.5 \pm 0.03
Cuevones	19.3 \pm 3.5	15.1 \pm 3.3	4.1 \pm 1.7	5.6 \pm 2.9	7.9 \pm 2.4	6.1 \pm 2.9	11.7 \pm 2.8	8.7 \pm 3.2	1.2 \pm 0.02	1.3 \pm 0.04
Manchones	11.8 \pm 3.2	9.2 \pm 2.7	3.6 \pm 2.6	0.1 \pm 0.1			5 \pm 2.5	1.5 \pm 0.5	1.3 \pm 0.02	1.4 \pm 0.03
Regional	19.2 \pm 1.3	17.1 \pm 1.2	13.5 \pm 2.8	8.5 \pm 1.9	10.6 \pm 2.1	7.9 \pm 1.8	8.5 \pm 1.4	6.9 \pm 1.2	1.4 \pm 0.20	1.3 \pm 0.02

3.2 Evidencia de daño en colonias y fragmentos coralinos

En cada uno de los sitios se registró el número de colonias afectadas, que después del paso de los huracanes estaban rotas o volteadas. En los 19 sitios, las colonias con crecimiento tipo ramoso más afectadas fueron las de *A. palmata*, con 78 colonias afectadas, seguidas de colonias con crecimiento folioso como *A. tenuifolia* y *M. complanata* con 8 y 20 colonias afectadas respectivamente. Colonias de crecimiento tipo digitiforme *P. furcata* y *P. porites* fueron afectadas con dos y 12 colonias. Las colonias con crecimiento masivo e incrustante afectadas son tres de *Agaricia agaricites*, tres de *Porites astreoides*, dos de *Pseudodiploria strigosa* y una colonia de *Siderastrea siderea* (Fig. 7).

Además, en los 19 sitios se registraron fragmentos de colonias de coral que podrían estar libres, fijos o restaurados después del paso de los huracanes. Las especies de tipo ramoso *A. palmata* y *A. cervicornis* fueron las que presentaron más fragmentos con 162 y seis respectivamente. En las especies tipo digitiforme fueron encontrados un fragmento de *E. fastigiata*, 22 de *M. alcicornis*, tres de *P. divaricata*, seis de *P. furcata* y 26 de *P. porites*. Especies con tipo de crecimiento folioso presentaron 41 fragmentos de *A. tenuifolia* y 24 fragmentos de *M. complanata*. Las especies de tipo masivas e incrustantes fueron las que presentaron menos fragmentos con: 24 de *A. agaricites*, tres de *P. astreoides* y un fragmento de *P. strigosa* (Fig. 7).

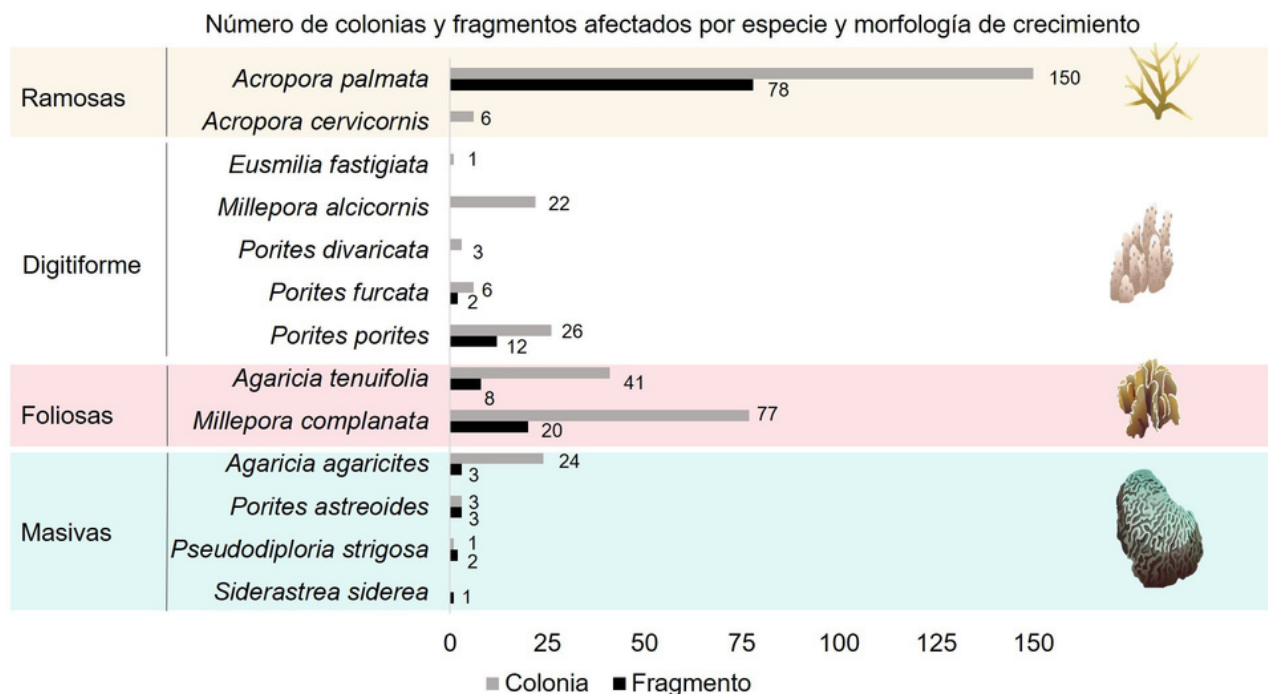


Figura 7. Número colonias y fragmentos afectados por especie y morfología de crecimiento (las especies se agruparon según González-Barrios (2018)). Las barras negras representan los fragmentos, las barras grises las colonias y el número de cada especie encontrada.

Se calculó el porcentaje de colonias afectadas por los huracanes en cada sitio. Las colonias afectadas son aquellas que se encontraron con evidencia de ruptura y volteadas (Fig. 8a). Los sitios donde no se encontraron colonias afectadas son: Punta Maroma Sur, Punta Maroma Centro, Punta Maroma Norte, La Pared y La Bocana. Los sitios con el mayor número de colonias afectadas fueron Limones y Nizuc, en Limones se encontró 8.7% colonias rotas y 8.13% de colonia volteadas, en Nizuc hay 1.2 % de colonias rotas y 11.3 % de colonias volteadas. El sitio de la Catedral Frontal también presentó un porcentaje alto de colonias rotas, con 9.1%. Los sitios de Jardines, Catedral posterior, Tanchacté Sur, Tanchacté Norte, Radio Pirata, Manchones Norte y Bonanza tienen entre 0.3-2.8% de colonias volteadas. Los sitios Bonanza profundo, Jardines, Nizuc, Catedral posterior, Bonanza, Fish Market, Cuevones, Manchones Cancún, Tanchacté Sur y Norte tuvieron entre 0.25-1.1% de colonias volteadas (Fig. 9a).

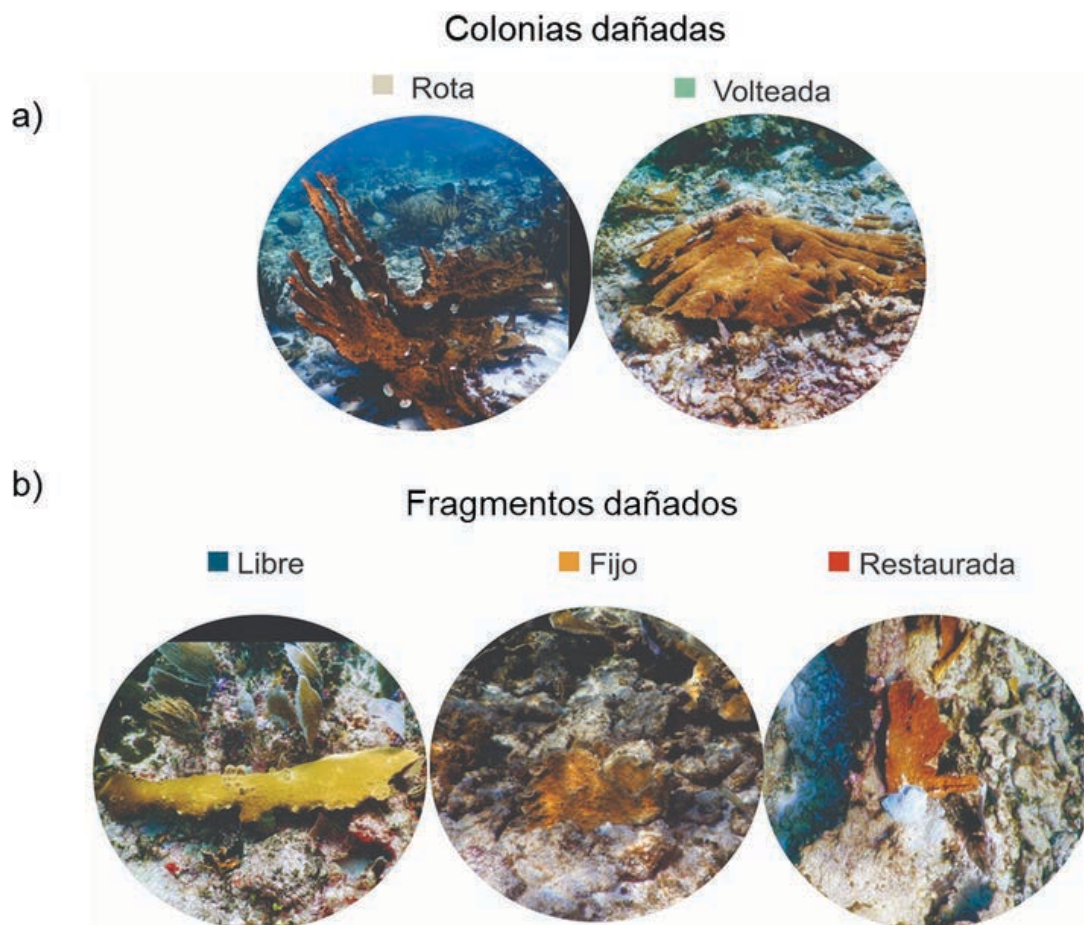


Figura 8. a) Imagen de colonias de coral dañadas: Rota el huracán rompió parte de su estructura, y se observa la de colonia de color blanco. Volteadas, cambiadas de posición por el huracán, que no comprometen su supervivencia. b) Clasificación de fragmentos en libres: estructura de coral desprendida de la colonia; fijo, de manera natural está cimentado en el arrecife y los restaurado: tuvieron intervención humana.

Para cada sitio calculó la densidad de fragmentos libres, fijos y restaurados (Fig. 8b) presentes en 10 m². Los fragmentos se registraron en casi todos los sitios, excepto en el sitio La Bocana. Siendo Nizuc el sitio con mayor número de fragmentos (14.8 frag./10 m²), seguido de Cuevones con 7 frag/10 m², La Catedral 5m con 4.8 frag/10 m², Maroma Centro con 4.6 frag/10 m² y Limones con 4.2 frag/10m². Los sitios restantes se encontraron entre 0.1-3.6 frag/10 m². Solo en el arrecife Limones se registraron fragmentos restaurados 0.14 frag/10 m² y se encontró fragmentos fijos en Nizuc y Cuevones con 0.8 y 0.1 frag/10 m² (Fig. 9b).

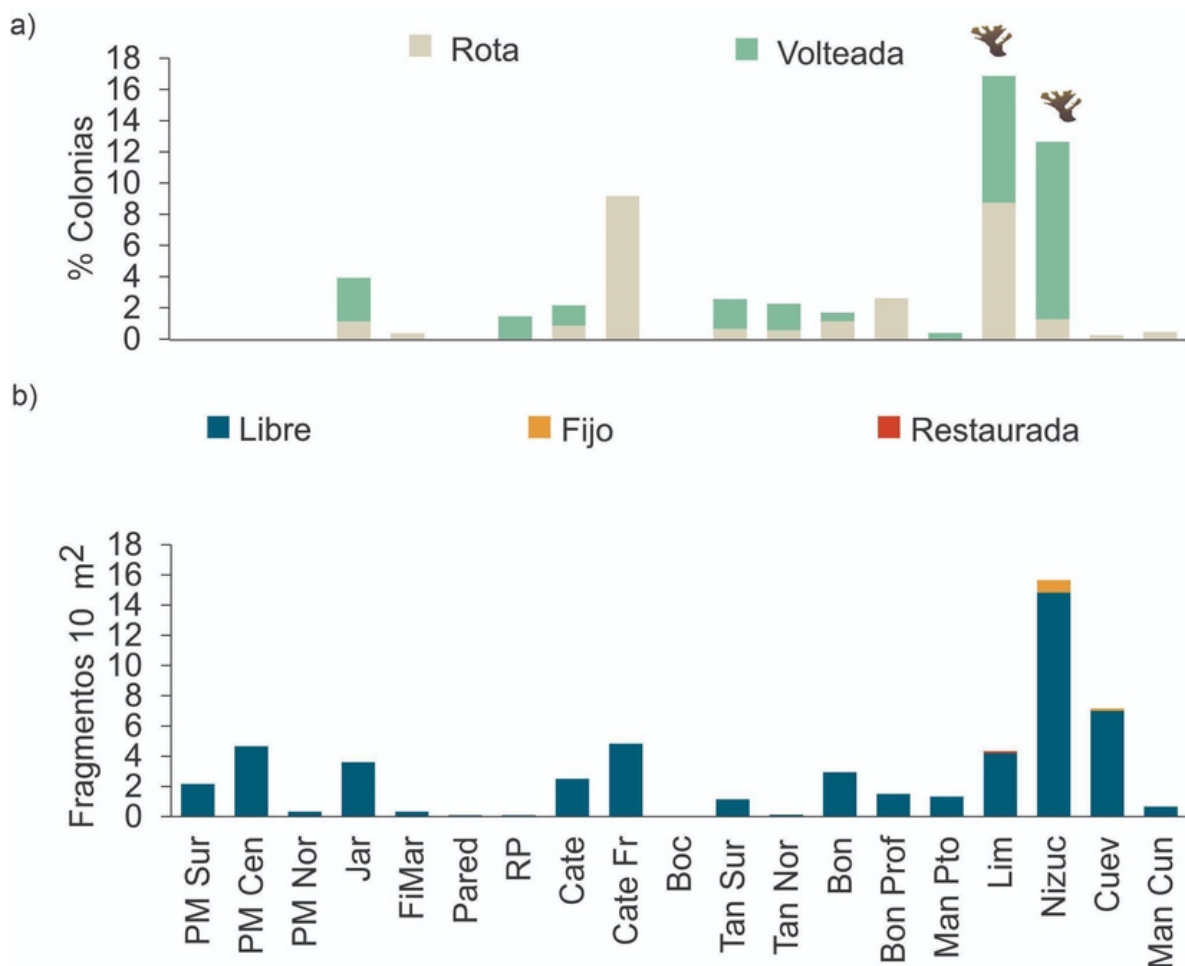


Figura 9. a) Porcentaje de colonias y b) Fragmentos por sitio tras el paso de los huracanes en un área de 10m².

3.3 Impacto en la integridad de colonias y parches de *Acropora palmata* en Arrecife Limones

Se generaron dos ortomosaicos, uno el 4 de agosto (previo a los eventos ciclónicos) y el segundo el 16 de octubre (posterior a los eventos ciclónicos Gama y Delta). El primer ortomosaico tiene una extensión de 23.6 ha y el segundo 26.2 ha, y ambos abarcan la extensión total de la unidad arrecifal de Limones. Se utilizó como base el ortomosaico del 4 de agosto, registrando un total de 763 colonias o parches de *A. palmata* lo que representa un área total de 11,430.07 m² (Fig. 10).

El parche de mayor tamaño registrado para este sitio fue de 1,448.62 m². Por otro lado, al analizar la imagen del 16 de octubre y contrastar con las colonias y parches encontrados el 4 de agosto, fueron localizadas 727 colonias, las cuales cubren un área de 10,093.47 m² (Fig. 11). Esto resulta en 1336.6 m² de área afectada lo que representa el 11.69% de área de los parches y colonias (Fig. 12).

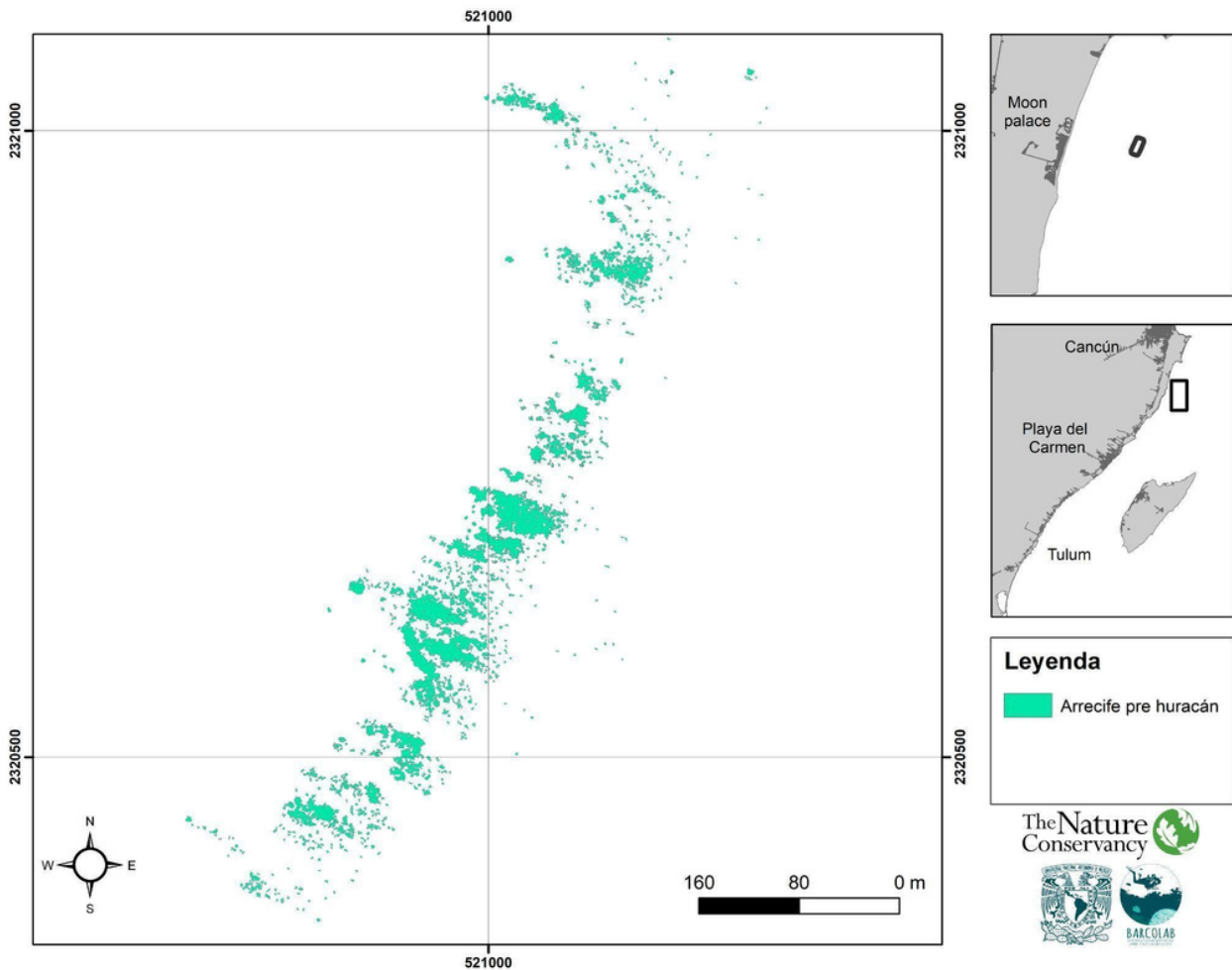


Figura 10. Mapa de las colonias y parches de *Acropora palmata* del 4 de agosto de 2021, previo a los eventos ciclónicos. Sistema de coordenadas UTM/WSG 84 Zona 16N.

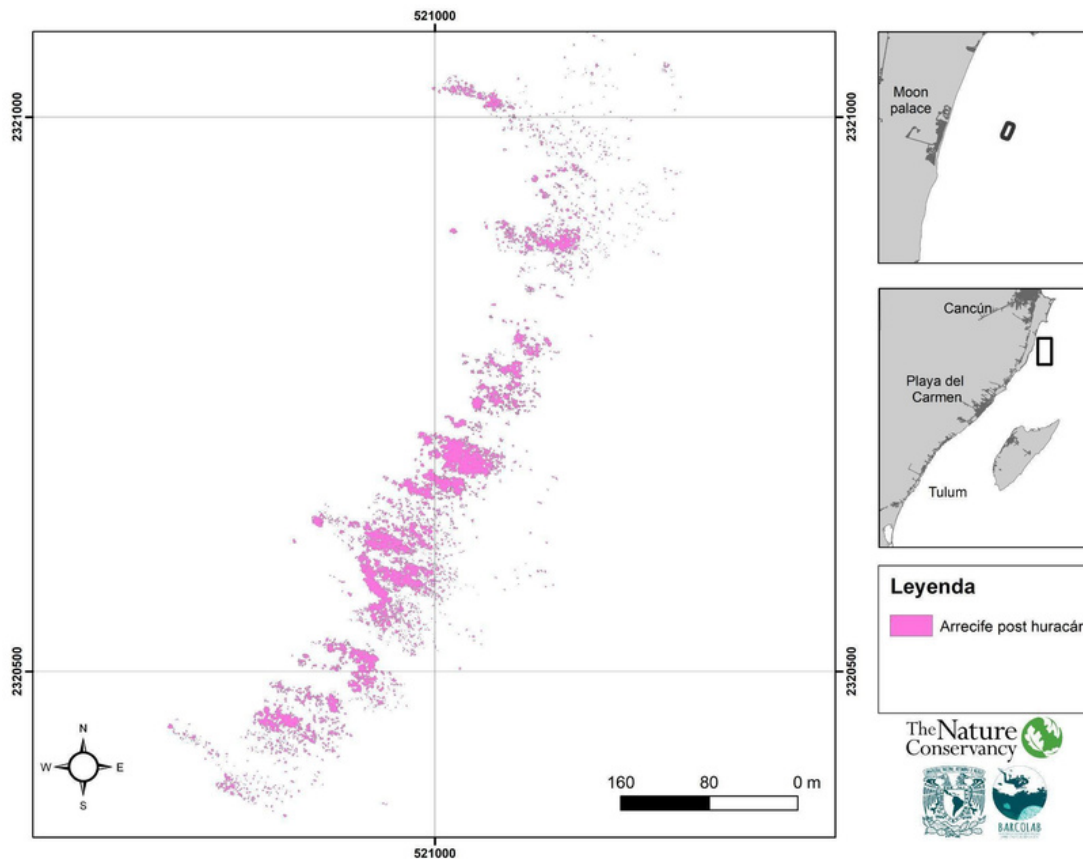


Figura 11. Mapa de las colonias y parches de *Acropora palmata* del 16 de octubre de 2021, posterior a los eventos ciclónicos Gama y Delta. Sistema de coordenadas UTM/WGS 84 Zona 16 N.

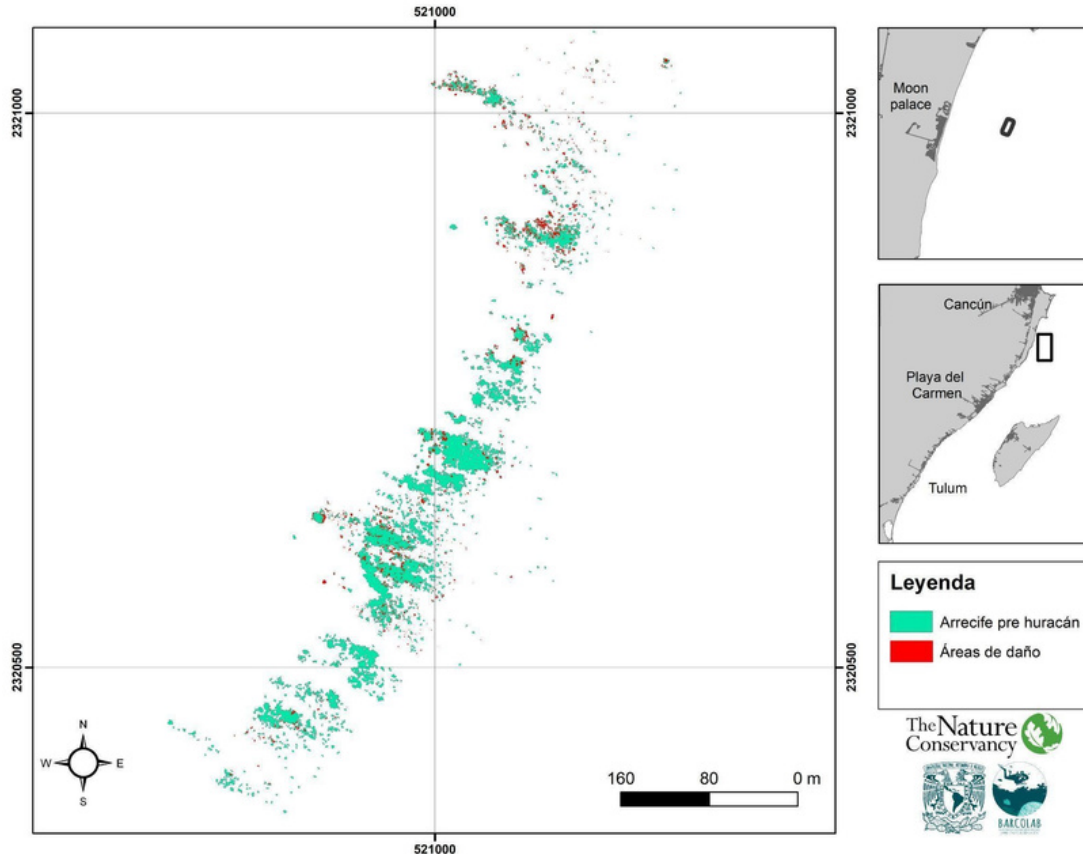


Figura 12. Mapa daños en las colonias y parches de *Acropora palmata* derivados de los eventos ciclónicos. En color rojo se muestran las áreas dañadas por los huracanes, mientras que en color verde se muestran las áreas que se mantuvieron ilesas. Sistema de coordenadas UTM/WGS 84 Zona 16N.

Al evaluar los cambios en los parches y colonias por categorías de talla (área en m^2), las cuales fueron generadas de acuerdo con la distribución de los datos, se encontró que las colonias y/o parches de *A. palmata* menores o iguales a $2 m^2$ tuvieron un porcentaje promedio de área dañada del 18.57% (± 2.35), siendo también la segunda categoría con mayor representación con 194 registros. Mientras tanto la categoría mejor representada fue la de 2 a $5 m^2$ con 361 registros, la cual presentó un promedio de daño del 15.61% (± 1.45) (Fig. 13). Por otro lado, la categoría de talla que presentó el mayor promedio de daño fue la categoría de 5 a $10 m^2$ con 19.42% (± 1.45), en contraste con la categoría de colonias mayores a $100 m^2$ que obtuvo el 11.26% (± 2.49), la cual fue la que menores daños presentó. Estos resultados muestran, que las colonias de menores dimensiones son las que recibieron el mayor nivel de daño físico por la acción de los huracanes (aunque este se mantiene constante en todas las categorías de talla), cabe señalar que las categorías de tallas menores a $10 m^2$, fueron la únicas que en las que se registraron pérdidas totales de los parche o colonias, esto aunado a que el estudio se centró en el registro de colonias mayores a $2 m^2$, por lo cual el nivel de daño en esta categoría pudiera estar subestimado.

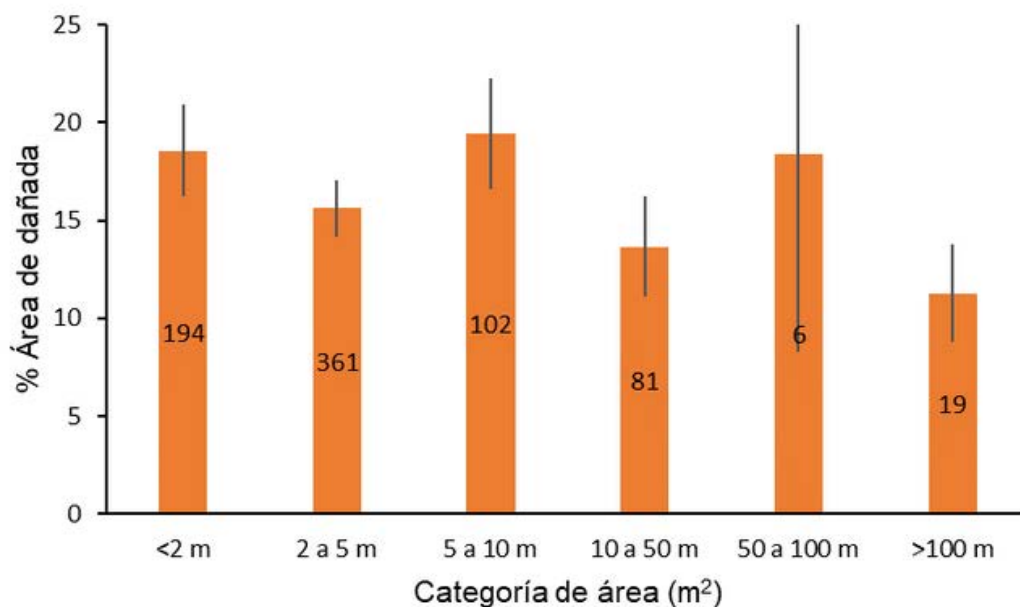


Figura 13. Porcentaje de área dañada por categoría de talla de las colonias y parches de *Acropora palmata*. Los números sobre las barras, representan el número de colonias y parches por categoría. Las barras de error representan el error estándar.

A causa de lo anterior, se evaluaron los daños de las colonias y parches menores a $10 m^2$, encontrando que el 62% de las colonias evaluadas no presenta daños aparentes, manteniendo su forma, área y perímetro íntegros. Por otra parte, el 33% tuvo algún nivel de daño, mientras que el 5% fueron pérdida total. Esto último quiere decir que el área total del parche o colonia no se encontró en el segundo ortomosaico (Fig. 14).

■ Dañada ■ Pérdida total ■ Sin daño aparente

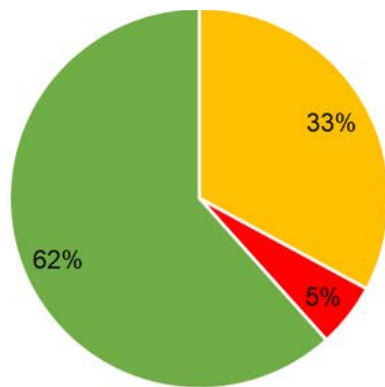


Figura 14. Porcentaje de daños en colonias menores de 2 m². Se clasificó en el nivel de daño en tres categorías: Sin daño aparente, son colonias que conservan la totalidad de su área y mantuvieron la integridad de su forma; Dañada, son colonias que perdieron algún porcentaje de su área o tuvieron cambios en su forma y Pérdida total, son las colonias que el total de su área no se encontraba en su lugar previo al paso de los huracanes Delta y Gama.

Por otro lado, al evaluar el efecto de los huracanes en las tres zonas de arrecifales del arrecife Limones (cresta arrecifal, arrecife posterior y arrecife frontal). Se encontró que las colonias y parches presentes en el arrecife posterior presentaron mayor porcentaje de daño con 19.17% (± 1.79 E.E.), la cresta arrecifal tuvo el 15.12% (± 1.26 E.E.) y el arrecife frontal tuvo el 5.8 (± 2.74 E.E.; Fig. 15).

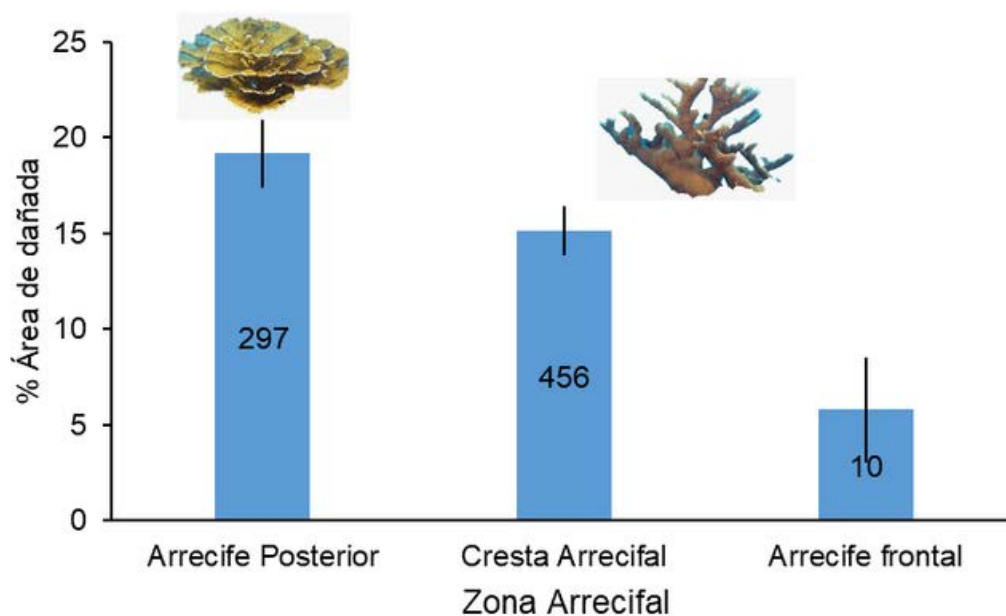


Figura 15. Porcentaje de área dañada por zona arrecifal (cresta, arrecife posterior y arrecife frontal) de las colonias y parches de *Acropora palmata*. Las figuras sobre las barras simbolizan el tipo de morfología predominante en ambas zonas arrecifales. Los números sobre las barras representan el número de colonias y parches por categoría. Las barras de error pertenecen al error estándar.

4 CONCLUSIONES

4

CONCLUSIONES

En octubre de 2020, los arrecifes del norte de Quintana Roo sufrieron el paso de tres huracanes. A pesar de que cada uno tuvo distintas intensidades, Gamma (H1), Delta (H2), Zeta (H1), se pudo observar que aparentemente los 19 sitios se vieron sometidos a una intensidad de viento similar en cada uno de los eventos. Esto significa que no existe una diferencia en la afectación de los sitios. Sin embargo, cabe destacar que el huracán Zeta, no abarcó los sitios en Cancún, mientras que para los sitios de Punta Maroma la intensidad de viento pudo ser mayor que la experimentada en los sitios ubicados más al norte.

Distintos estudios, tanto a nivel global como en el Caribe, han encontrado que los impactos de los huracanes varían de acuerdo a su categoría, principalmente aquellos fenómenos de baja intensidad (e.g. depresión tropical, tormenta tropical, categoría 1 y categoría 2), causan impactos leves en los arrecifes (Gardner, 2005; Pérez-Cervantes et. al., 2020; Alvarez-Filip 2021). Estos impactos pueden no verse reflejados en la cobertura de coral utilizando análisis convencionales (i.e. cobertura de bentos y estado de las comunidades coralinas), lo cual se ve reflejado en este estudio, donde la cobertura de coral no mostró un cambio significativo en el 84% de los sitios. En Punta Maroma Punta Maroma Sur, Bonanza Profundo y Manchones Norte sí se observó un declive significativo, el cual puede ser consecuencia de la enfermedad del Síndrome Blanco, la cual afectó gravemente a estos arrecifes entre 2018-2019, especialmente a especies masivas (Álvarez-Filip et al., 2019).

De igual manera, se observó que, en el sitio de Manchones Norte, las especies frágiles (i. e. especies susceptibles al rompimiento) tuvieron un declive significativo, esto se debió principalmente al declive de *A. cervicornis* y de *A. tenuifolia*. La pérdida de la primera especie se debió a que en 2018 fue atacada por una enfermedad, posiblemente asociada al Síndrome Blanco, mientras que la segunda especie fue altamente susceptible a la enfermedad Síndrome Blanco. Es importante señalar que aunque en el arrecife de Punta Maroma Sur no existe un cambio significativo, sí se observó un grave declive en la cobertura de estas especies, en especial de *A. tenuifolia*. Esta especie también fue afectada por el Síndrome Blanco, lo que podría explicar este declive; en nuestras evaluaciones se observaron numerosos fragmentos de esta especie, lo cual sugiere que los huracanes también podrían haber afectado esta especie.

Al observar la morfología más afectada por el paso de los huracanes, se concluye que las especies más afectadas son las de crecimiento ramoso, como *A. palmata*, seguidas de las especies foliosas como *M. complanata* y *A. tenuifolia*, ya que fueron las especies con mayor número de fragmentos registrados. Por el contrario, las especies masivas e incrustantes son las menos afectadas en su morfología por los efectos de los huracanes.

En los sitios Limones y Nizuc se encontró el mayor número de especies afectadas, con colonias volteadas y rotas, sitios que se caracterizan por su alta cobertura de colonias de *A. palmata*. El mayor número de fragmentos se encontró en Nizuc, en donde además se encontraron fragmentos ya fijos al sustrato, este tipo de fragmentos también se encontraron en el arrecife Cuevones de Cancún. Este sitio se caracteriza por ser una zona de restauración de *A. palmata* desde 2015. El sitio Limones fue el único sitio donde las labores de las Brigadas de Contingencia Ambiental del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos coincidieron con nuestro sitio de monitoreo, lo que se refleja en los fragmentos restaurados que se identificaron para este sitio (Apéndice 1, Fig. 11s). La Bocana fue el único sitio donde no se observaron fragmentos, el principal motivo es que este sitio se caracteriza por colonias masivas, las cuales se ven poco afectadas por los huracanes.

El contraste de ortomosaicos resultó ser una metodología altamente efectiva para determinar los daños en los arrecifes de coral poco profundos. Cabe resaltar que estos resultados solo demuestran el impacto ocasionado por los huracanes Gamma y Delta. Se encontró, una pérdida en el tamaño de los parches y colonias equivalente al 11.69% de su cobertura. No obstante, los daños a los parches y colonias de *A. palmata* no necesariamente representan algo perjudicial para esta especie, ya que la reproducción por fragmentación es el principal medio de propagación de esta especie (Highsmith 1982). Es por ello, que el monitoreo subsecuente de los fragmentos generado de los huracanes nos puede traer más información de las consecuencias a largo plazo del impacto de los huracanes, así como la influencia de estos sobre la dispersión y supervivencia de los fragmentos de *A. palmata* generados por los mismos.

Asimismo, se encontró que el daño a los parches y colonias predomina en colonias y parches menores a 10 metros, seguido de los menores a 2 metros, siendo los menos afectados los parches de dimensiones mayores. De ahí que, el 5% de las colonias y parches menores a 10 m² se perdieron totalmente, mientras el 33% tuvieron algún tipo de daño, lo cual nos indica que el 38% de las colonias menores a 10 m² se vieron afectadas por el paso de los huracanes Gama y Delta. Una de las razones de estos daños puede ser que la cimentación de las colonias pequeñas es menor que las colonias de mayor tamaño, y otra es que al ser parches o colonias aislados el porcentaje de la superficie que recibe el impacto del oleaje es mayor.

Además, se encontró que la zona arrecifal con mayor daño fue el arrecife posterior con un promedio de 19.15% de área daño en sus parches y colonias mientras que en la cresta arrecifal fue de 15.12%. El mayor daño probablemente se deba a que las colonias que se encuentran en el cresta arrecifal se encuentran más adaptadas a los embates del oleaje que las que se encuentran en el arrecife posterior, que se encuentran más resguardadas del oleaje. Otra causa es que su morfología generalmente presenta formas más complejas con menor hidrodinámica que las que se encuentran en la cresta arrecifal, cuyas morfologías tipo lanza tienen una mayor hidrodinámica (Fig. 14).

5



REFERENCIAS

5

REFERENCIAS

Alvarez-Filip, L., Côté, I. M., Gill, J. A., Watkinson, A. R., and Dulvy, N. K. (2011a). Region-wide temporal and spatial variation in Caribbean reef architecture: Is coral cover the whole story? *Global Change Biology* 17, 2470–2477. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02385.x.

Alvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Côté, I. M., Watkinson, A. R., and Gill, J. A. (2011b). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications* 21, 2223–2231. doi:10.1890/10-1563.1.

Alvarez-Filip, L., Gill, J. A., and Dulvy, N. K. (2011c). Complex reef architecture supports more small-bodied fishes and longer food chains on Caribbean reefs. *Ecosphere* 2, art118. doi:10.1890/ES11-00185.1.

Alvarez-Filip, L., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., González-Barrios, F.J., Secaira Fajardo, F. 2021. Comparative analysis of risks faced by the world's coral reefs. UNAM-The Nature Conservancy.

Aronson, R. B., and Precht, W. F. (2001). White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. in *Hydrobiologia*, 25–38. doi:10.1023/A:1013103928980.

Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., and Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429, 827–833. doi:10.1038/nature02691.

Bozec, Y.-M., Alvarez-Filip, L., and Mumby, P. J. (2015). The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. *Glob. Chang. Biol.* 21, 223–235. doi:10.1111/gcb.12698.

Bravo-Lujano, C. (2020a). Reseña del Huracán "Delta " del Océano Atlántico. Available at: CONAGUA.

Bravo-Lujano, C. (2020b). Reseña del Huracán "Gamma" del Océano Atlántico.

Bruckner, A. W. (2002). Proceedings of the Caribbean Acropora Workshop: Potential Application of the U.S. Endangered Species Act as a Conservation Strategy. *Proceedings of the Caribbean Acropora Workshop*, 199.

Burke, L., Reytar, K., Spalding, M., and Perry, A. (2011). *Reefs at risk*. doi:10.1016/0022-0981(79)90136-9.

Canfield, R. H. (1941). Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of forestry* 39, 388–394.

Cangialosi, J. P., and Berg, R. (2021). National Hurricane Center Tropical Cyclone Report. Hurricane Delta.

Cinner, J. E., Huchery, C., Macneil, M. A., Graham, N. A. J., Mcclanahan, T. R., Maina, J., et al. (2016). Bright spots among the world ' s coral reefs. *Nature*, 1–17. doi:10.1038/nature18607.

- Chollett, I., Mumby, P. J., Müller-Karger, F. E., & Hu, C. (2012). Physical environments of the Caribbean Sea. *Limnology and Oceanography*, 57(4), 1233-1244.
- Gardner, T. a, Gill, J. a, Grant, A., Watkinson, a R., and Côté, I. M. (2005). Hurricanes and Caribbean coral reefs: immediate impacts, recovery trajectories and contribution to long-term decline. *Ecology* 86, 174–184. doi:10.1890/04-0141.
- Gallegos-Aguilar E. (2021). Informe de actividades realizadas por las Brigadas de respuesta inmediata tras el paso del huracán Delta y Zeta en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. SEMARNAT, CONANP, MARFUND.
- Gladfelter, W. B. (1982). White Banda Disease in *Acropora Palmata*: Implication for the structure and growth of shallow reefs. 32, 639–643.
- González-Barrios, F. J., and Alvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators* 95, 877–886. doi:10.1016/j.ecolind.2018.08.038.
- Graham, N. A. J., Cinner, J. E., Norström, A. V., and Nyström, M. (2014). Coral reefs as novel ecosystems: embracing new futures. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 7, 9–14. doi:10.1016/j.cosust.2013.11.023.
- Highsmith, R. C. (1982). Reproduction by fragmentation in corals. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 7(2), 207-226.
- Huntington, B. E., Miller, M. W., Pausch, R., and Richter, L. (2017). Facilitation in Caribbean coral reefs: high densities of staghorn coral foster greater coral condition and reef fish composition. *Oecologia* 184, 247–257. doi:10.1007/s00442-017-3859-7.
- Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP (2000). Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. 224.
- Jackson, J. B. C., Donovan, M. K., Cramer, K. L., Lam, V., and Lam, W. (2014). Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. *Global Coral Reef Monitoring Network*, IUCN, Gland, Switzerland, 306.
- Lang, J. C., Marks, K. W., Kramer, P. R., Kramer, P. A., and Ginsburg, R. N. (2012). AGRRA Protocols. Version 5.5. The Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program.
- Latto, A. S. (2021). National Hurricane Center Tropical Cyclone Report. Hurricane Gamma.
- Lester, S. E., Rassweiler, A., McCoy, S. J., Dubel, A. K., Donovan, M. K., Miller, M. W., et al. (2020). Caribbean reefs of the Anthropocene: Variance in ecosystem metrics indicates bright spots on coral depauperate reefs. *Global Change Biology* 26, 4785–4799. doi:10.1111/gcb.15253.
- Lirman, D., and Fong, P. (1997a). Patterns of damage to the branching coral *Acropora palmata* following Hurricane Andrew: Damage and survivorship of hurricane-generated asexual recruits. *J. Coast. Res.* 13, 67–72.
- Lirman, D., and Fong, P. (1997b). Susceptibility of coral communities to storm intensity, duration, and frequency. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp* 1, 561–566. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:susceptibility+of+coral+communities+to+storm+intensity,+duration,+and+frequency#0>.
- Madin J. S., Connolly S. R. (2006) Ecological consequences of major hydrodynamic disturbances on coral reefs. *Nature* 444,477-80. doi: 10.1038/nature05328. PMID: 17122855.
- Marcelo-Domínguez, I. (2020). Huracán "Zeta" del Océano Atlántico.
- Moberg, F., and Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29, 215–233. doi:10.1016/S0921-8009(99)00009-9.

Núñez-Lara, E., Cahuich-Carrillo, A., Delgado-Estrella, A., and Laffon-Leal, S. (2015). Tourism and sustainability indicators as planning tools for a coastal NPA in Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 193, 355-364.

Nyström, M., Folke, C., and Moberg, F. (2000). Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology and Evolution* 15, 413-417. doi:10.1016/S0169-5347(00)01948-0.

Pandolfi, J. M., Bradbury, R. H., Sala, E., Hughes, T. P., Bjorndal, K. A., Newman, M. J. H., et al. (2003). Global Trajectories of the Long-Term Decline of Coral Reef Ecosystems. *Science* 301, 955-958. doi:10.1126/science.1085706.

Patterson, K. L., Porter, J. W., Ritchie, K. B., Polson, S. W., Mueller, E., Peters, E. C., et al. (2002). The etiology of white pox, a lethal disease of the Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 8725-8730. doi:10.1073/pnas.092260099.

Pérez -Cervantes, Esmeralda; Pardo-Urrutia, Fernando; Alvarez-Filip, Lorenzo; Secaira Fajardo, Fernando; Ruiz Alvarado, Claudia y Álvarez Rocha, Mariana. 2020. Daños causados por huracanes a los arrecifes de coral en el Caribe y su correlación con las características de los huracanes y los arrecifes. Iniciativa Mesoamericana de Rescate de Arrecifes - MAR Fund, UNAM and The Nature Conservancy.

Risk, M. J. (1972). Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. *Atoll Research Bulletin*.

SEMARNAT-CONANP (2016). Programa de Manejo Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. 23.

Sutherland, K. P., Porter, J. W., Turner, J. W., Thomas, B. J., Looney, E. E., Luna, T. P., et al. (2010). Human sewage identified as likely source of white pox disease of the threatened Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Environmental Microbiology* 12, 1122-1131. doi:10.1111/j.1462-2920.2010.02152.x.

Taylor, H. T., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2012). The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. <https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>

Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., and Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology* 33, 1023-1034. doi:10.1111/1365-2435.13331.



APÉNDICE 1

APÉNDICE 1

Evidencia fotográfica de los daños ocasionados por los huracanes en los distintos sitios monitoreados:



Figura 1s. Colonias de coral en La Pared, ubicado dentro del PNAPM. Colonia de restauración (sup. izq.), colonia de *Acropora palmata* rota (sup. der.), fragmentos de *A. palmata* (inf. izq.) y fragmento de *Millepora complanata* (inf. der.).

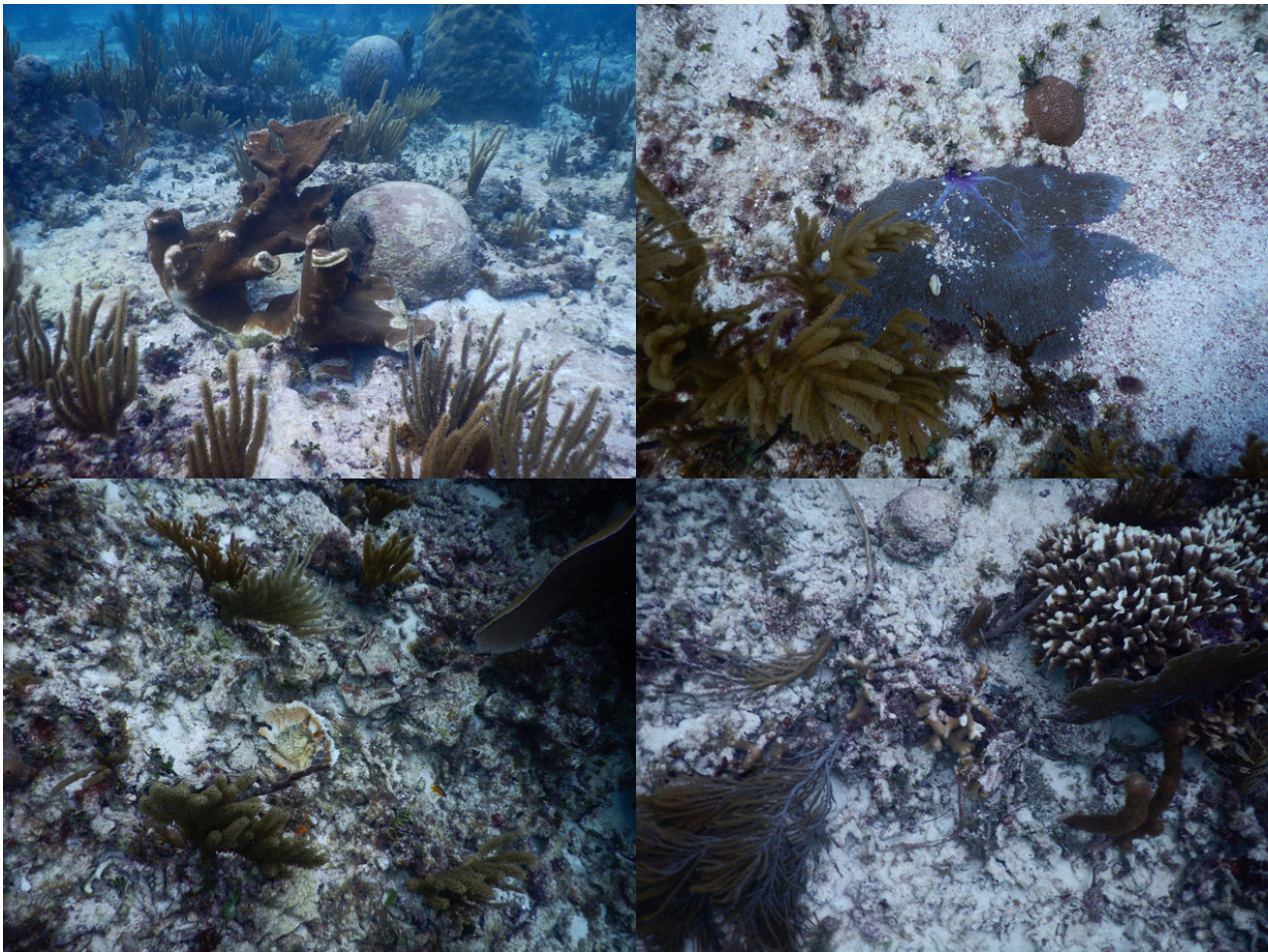


Figura 2s. Daños ocasionados por los huracanes en Jardines ubicado dentro del PNAPM. Fragmento de *Acropora palmata* (sup. izq.), abanico de mar, *Gorgonia spp.* desprendido (sup. der.), fragmento de *Agaricia tenuifolia* (inf. izq.) y colonias rotas de *Porites porites* (inf. der.).



Figura 3s. Estructura de *Acropora palmata* en el Arrecife Radio Pirata ubicado dentro del PNAPM.

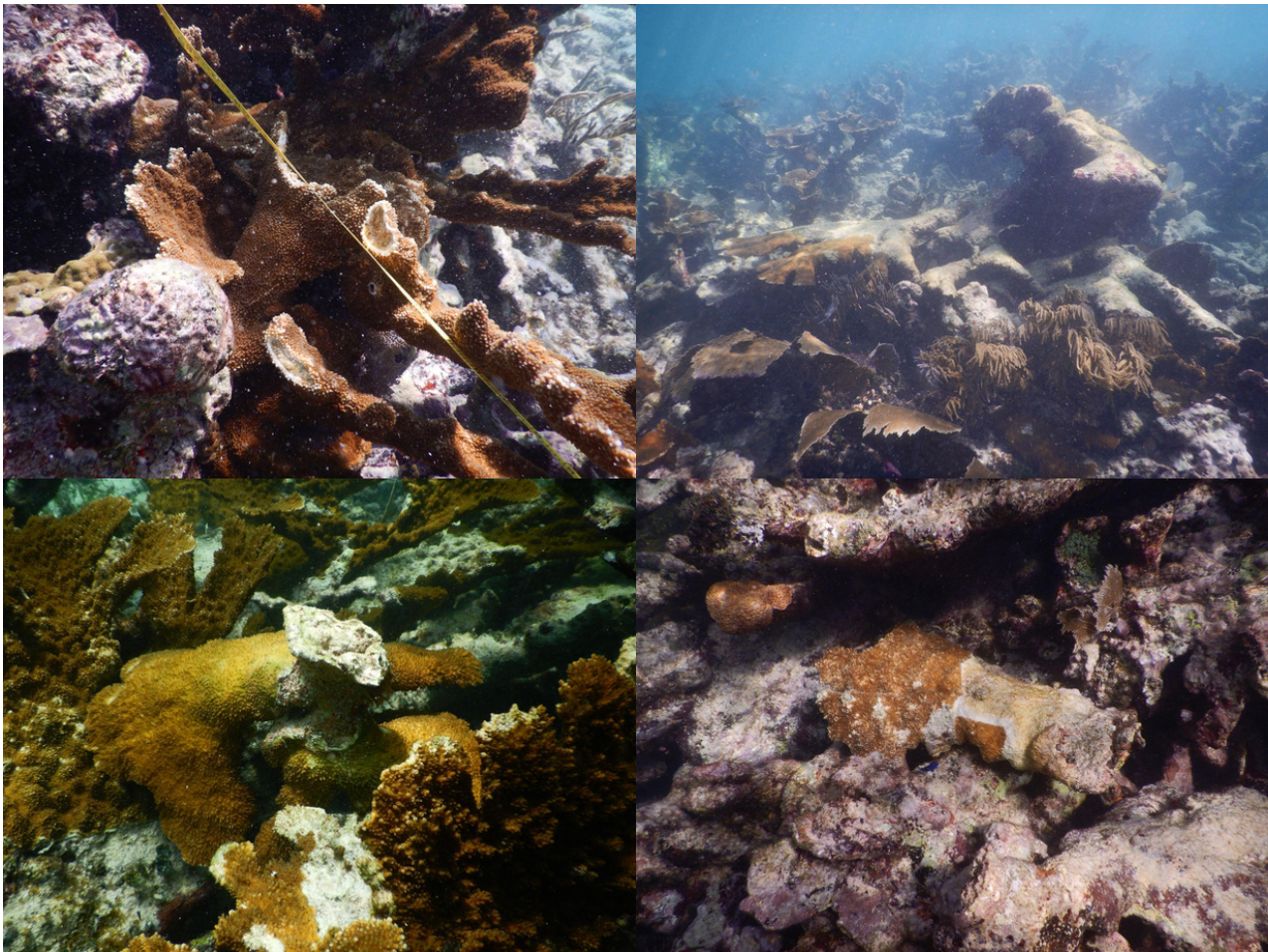


Figura 4s. Daños ocasionados en *Acropora palmata* por los huracanes en La Catedral Posterior, sitio ubicado dentro del PNAPM. Colonia rota (sup. izq.), colonia volteada sup. der.), colonia volteada (inf. izq.) y fragmento libre (inf. der.).



Figura 5s. Colonias afectadas por los huracanes en La catedral 5m, ubicado dentro del PNAPM. Fragmento libre de *Acropora palmata* (izq.), y fragmentos de *Agaricia agaricites* (der.).



Figura 6s. Colonias de coral en Tanchacté Sur, ubicado dentro del PNAPM. Colonia rota de *Acropora palmata* (izq.), colonia de *Gorgonia spp.* volteada (cen.) y una colonia de *Porites porites* rota (der.).

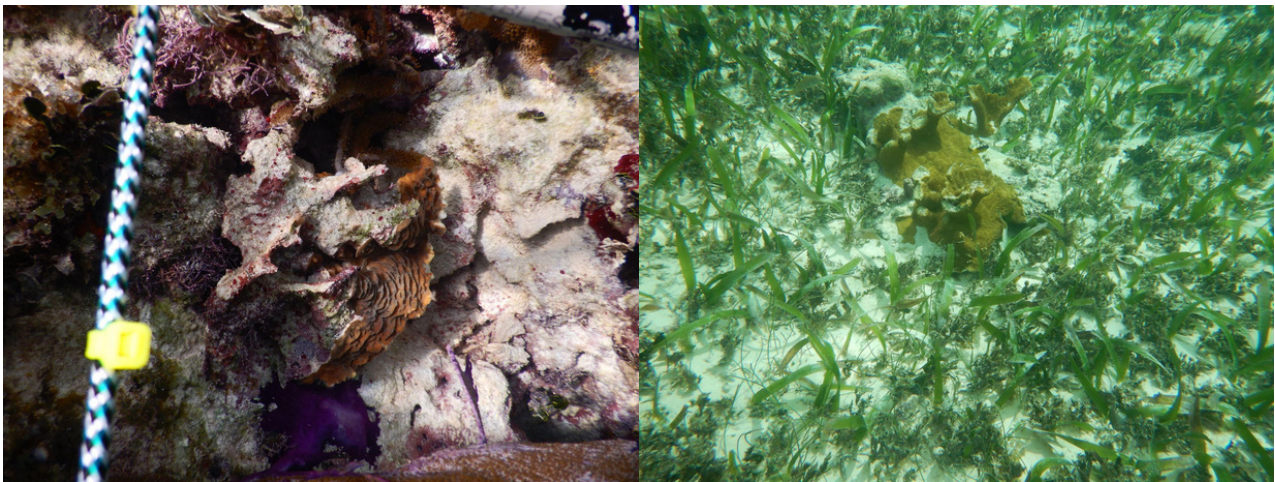


Figura 7s. Colonias afectadas en Bonanza, ubicado dentro del PNAPM. Fragmento libre de *Agaricia agaricites* (izq.), y colonia rota de *A. palmata* (der.).

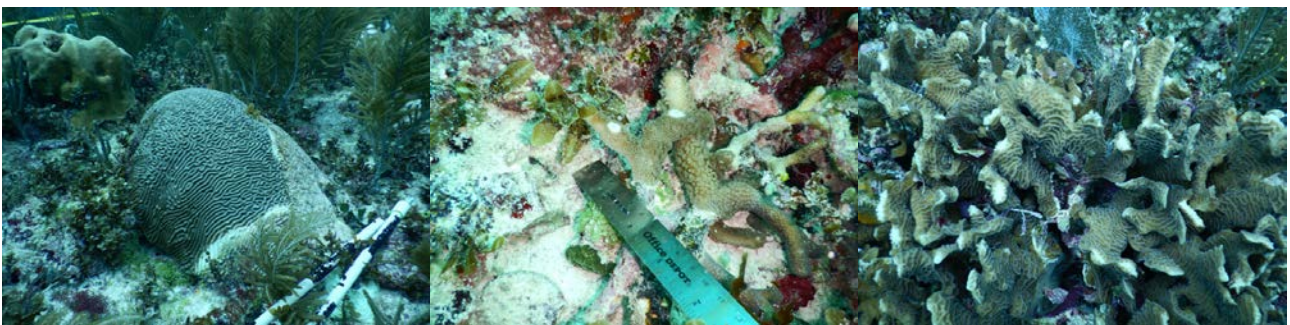


Figura 8s. Colonias de coral en Bonanza profundo, ubicado dentro del PNAPM. Colonia enferma de *Pseudodiploria strigosa* (izq.), colonia rota de *Porites furcata* (cen.) y una colonia rota de *Agaricia tenuifolia* (der.).

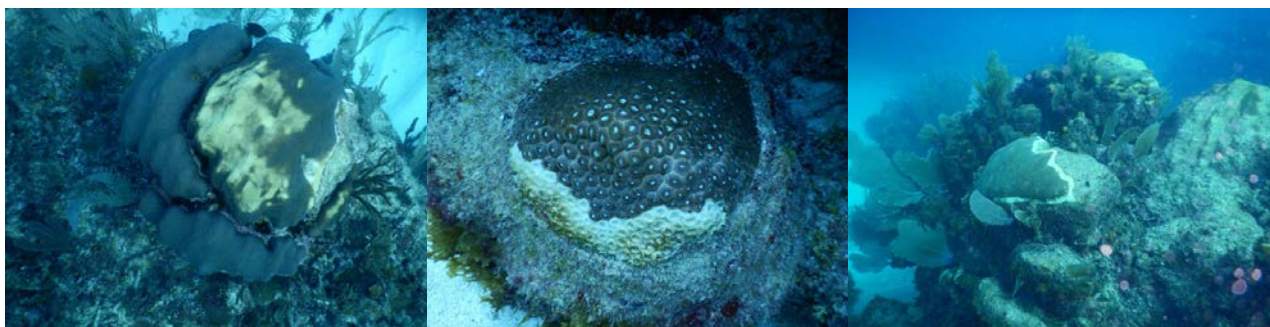


Figura 9s. Colonias de coral en el arrecife Manchones Puerto, sitio ubicado dentro del PNAPM. Colonia de *Orbicella faveolata* blanqueada (izq.), colonia enferma de *Montastraea cavernosa* (cen.) y una colonia enferma de *Orbicella faveolata* (der.).



Figura 10s. Daños ocasionados en las colonias de *Acropora palmata*, por los huracanes en Limones sitio ubicado dentro del PNAPM. Fragmentos de *A. palmata* y *Millepora complanata* (sup. izq.), colonia volteada y rota (sup. der.), fragmento (inf. izq.) y colonia volteada (inf. der.).



Figura 11s. Fragmentos restaurados de *Acropora palmata* en Limones, sitio ubicado dentro del PNAPM.



Figura 12s. Daños ocasionados en colonias de *Acropora palmata* por los huracanes en Nizuc, sitio ubicado dentro del PNCOIMPCPN. Fragmentos (sup. izq.), colonia volteada y rota (sup. der.), y colonia volteada (inf. izq. e inf. der.).

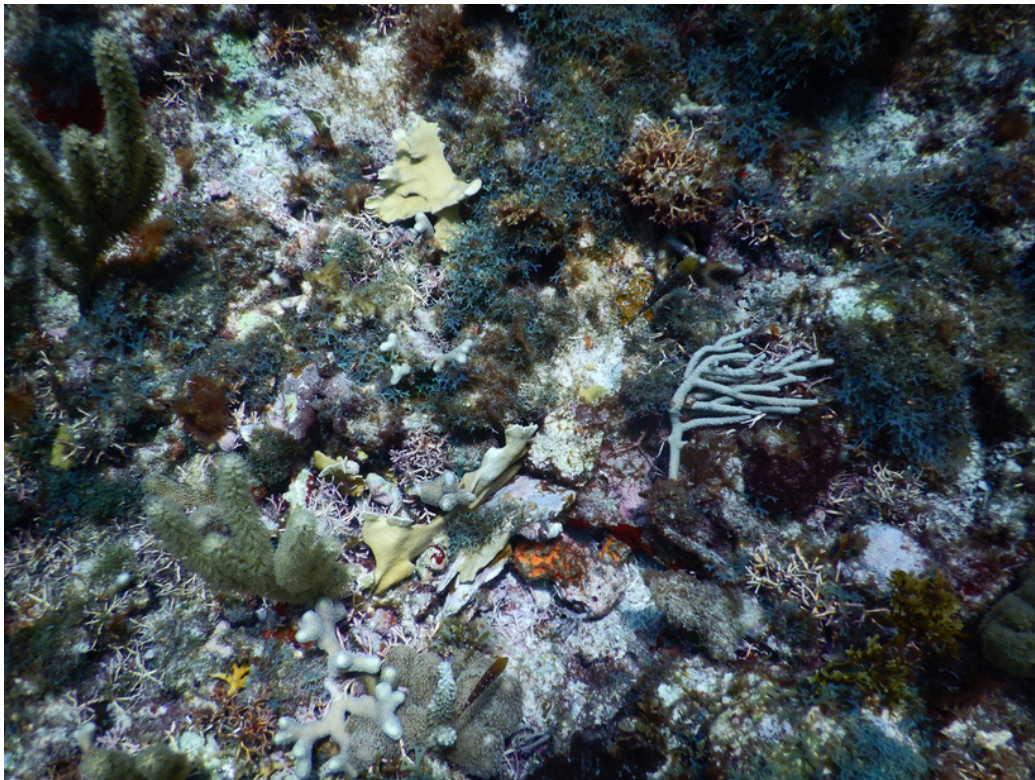


Figura 13s. Fragmentos de *Millepora complanata*, *M. alcicornis* y *Porites porites* en Cuevones sitio ubicado dentro del PNCOIMPCPN.



EFFECTO DEL HURACÁN DELTA EN LOS ARRECIFES DEL NORTE DE QUINTANA ROO

NURIA ESTRADA-DALDÍVAR, ESMERALDA PEREZ-CERVANTES, EDUARDO NAVARRO-ESPINOZA, FERNANDO SECAIRA-FAJARDO, Y LORENZO ÁLVAREZ-FILIP.