



Proyecto

Comunidades Sostenibles para la Acción Climática en la Península de Yucatán (ACCIÓN Yucatán)

Consultoría: Estudio de prefactibilidad climática para evaluar la vulnerabilidad de ecosistemas de arrecifes de coral en Campeche, Quintana Roo y Yucatán

Nombre de la firma consultora: BARCO A.C.

Número de contrato: D-58-5-23-0377

Número de producto: 3/3

Fecha de entrega: 31 de julio de 2023

Descripción del producto: Informe de análisis de la vulnerabilidad de arrecifes de coral en Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

Tabla de contenido

I. Introducción	18
II. Objetivos de la consultoría	20
II.1. Objetivos específicos	20
III. Caracterización de los servicios ecosistémicos proporcionados y evaluación de su importancia económica y ambiental en el área de incidencia del proyecto ACCIÓN	21
III.1. Pesca	23
III.2. Protección de la línea de costa	25
III.3. Hábitat	26
III.4. Beneficios de la biodiversidad	26
III.5. Ciclos biogeoquímicos	27
III.6. Turismo	27
IV. Metodología	30
IV.1. Parámetros ecológicos.....	30
IV.1.1. <i>Recopilación y sistematización de información de cobertura de coral, cobertura de macroalgas carnosas y biomasa de peces</i>	30
IV.1.2. <i>Enfermedades coralinas</i>	36
IV.1.3. <i>Índice de salud arrecifal</i>	36
IV.1.4. <i>Índices ecológicos</i>	38
IV.1.4.1. <i>Análisis estadísticos realizados a los indicadores ecológicos</i>	39
IV.1.4.1.1. <i>Prueba de Kruskal-Wallis</i>	39
IV.1.4.1.2. <i>Análisis Post Hoc</i>	39
IV.1.5. <i>Indicadores climáticos</i>	40
IV.1.5.1. <i>Estrés térmico</i>	40
IV.1.5.2. <i>Ciclones</i>	42
IV.1.5.3. <i>Descripción de colecta y revisión de datos climáticos existentes a nivel estatal</i>	43
IV.1.5.4. <i>Evaluación de la vulnerabilidad y de la relación de causalidad para cada factor de vulnerabilidad o amenaza identificado en los ecosistemas de arrecife de coral</i>	44
IV.2. Estresores locales y globales	44
IV.2.1. <i>Derrame de hidrocarburos</i>	44
IV.2.2. <i>Encallamientos</i>	44

IV.3.	Densidad poblacional y demografía	44
IV.4.	Descripción de las principales amenazas percibidas por la población local, y recomendaciones para la implementación de estrategias para su prevención y mitigación.....	45
IV.4.1.	<i>Levantamiento de información de campo</i>	46
IV.5.	Identificación de objetivos y metas de conservación y restauración	47
V.	Resultados	48
V.1.	Parámetros ecológicos.....	48
V.1.1.	<i>Cobertura de coral</i>	50
V.1.2.	<i>Cobertura de macroalgas carnosas</i>	52
V.1.3.	<i>Biomasa de peces herbívoros</i>	53
V.1.4.	<i>Biomasa de peces comerciales</i>	55
V.1.5.	<i>Índices de cobertura de coral</i>	55
V.1.6.	<i>Análisis estadísticos de indicadores ecológicos</i>	59
V.2.	Descripción de colecta de datos climáticos existentes a nivel estatal	61
V.3.	Indicadores de sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa	63
V.3.1.	<i>Enfermedades de coral</i>	63
V.3.1.1.	<i>Descripción</i>	63
V.3.1.2.	<i>Patrones históricos (exposición)</i>	64
V.3.1.3.	<i>Evaluación de sensibilidad de enfermedades en arrecifes</i>	66
V.3.1.4.	<i>Evaluación de capacidad adaptativa de enfermedades en arrecifes</i>	69
V.3.1.5.	<i>Proyecciones</i>	70
V.3.2.	<i>Estrés térmico</i>	70
V.3.2.1.	<i>Descripción (exposición)</i>	70
V.3.2.2.	<i>Patrones históricos (exposición)</i>	73
V.3.2.3.	<i>Proyecciones (exposición)</i>	77
V.3.2.4.	<i>Sensibilidad al blanqueamiento</i>	78
V.3.2.5.	<i>Capacidad adaptativa</i>	81
V.3.2.5.1.	<i>Tasa de Reclutamiento y Conectividad</i>	82
V.3.2.5.2.	<i>Áreas Naturales Protegidas</i>	82
V.3.3.	<i>Huracanes</i>	82
V.3.3.1.	<i>Descripción (exposición)</i>	82
V.3.3.2.	<i>Patrones históricos (exposición)</i>	83

V.3.3.3.	<i>Evaluación de sensibilidad de huracanes en arrecifes</i>	86
V.3.3.4.	<i>Capacidad adaptativa de huracanes en arrecifes.</i>	88
V.3.3.5.	<i>Proyecciones</i>	89
V.3.4.	<i>Densidad poblacional y demografía</i>	89
V.4.	Estresores locales y globales	92
V.4.1.	<i>Derrames de hidrocarburos</i>	95
V.4.2.	<i>Encallamientos</i>	96
V.4.3.	<i>Levantamiento de campo</i>	99
V.5.	Evaluación de la vulnerabilidad y de la relación de causalidad para cada factor de vulnerabilidad o amenaza identificado en los ecosistemas de arrecife de coral.....	101
V.6.	Descripción de las principales amenazas percibidas por la población local, y recomendaciones para la implementación de estrategias para su prevención y mitigación.....	109
V.6.1.	Recomendaciones para la implementación de estrategias de prevención y mitigación	116
V.7.	Identificación de objetivos y metas de conservación y restauración para las especies, ecosistemas y servicios ecosistémicos asociados los ecosistemas de arrecife de coral en cada estado	118
V.7.1.	<i>Proyectos de restauración en Yucatán</i>	118
V.7.2.	<i>Proyectos de restauración en Quintana Roo</i>	118
V.8.	Evaluación de la capacidad humana para hacer la restauración, con técnicas adecuadas y personal capacitado y suficiente	121
VI.	Conclusiones	130
VII.	Lecciones aprendidas	133
VIII.	Fuentes de consulta	135
IX.	Anexo 1 Indicadores climatológicos recabados de las boyas oceanográficas del SIMAR de la CONABIO.....	150
X.	Anexo 2 Lista de participantes invitados a responder el cuestionario sobre percepción de amenazas	154
XI.	Anexo 3 Lista de los 205 sitios utilizados para los análisis del estudio en las diferentes regiones de la Península de Yucatán.....	159
XII.	Anexo 4. Análisis estadísticos Kruskal-Wallis.....	166
XIII.	Anexo 5 Porcentaje de especies de coral de las diferentes regiones de la Península de Yucatán.....	174

Índice de tablas

Tabla 1. Principales servicios ecosistémicos de los arrecifes de la Península de Yucatán	21
Tabla 2. Número de habitaciones de hoteles en las regiones del proyecto ACCIÓN	28
Tabla 3. Regiones correspondientes al proyecto acción en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo y las regiones usadas en análisis de arrecifes.....	31
Tabla 4. Información de colecta de 205 sitios en los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo	32
Tabla 5. Extensión del arrecife en las diferentes regiones de estudio de arrecifes.....	34
Tabla 6. Regiones y años en los que se encontró información, así como número de sitios por región, número de sitios con series de tiempo.....	35
Tabla 7. Valores de los indicadores del índice de salud arrecifal tomada de reporte de la salud ecológica del arrecife mesoamericano 2022	38
Tabla 8. Nivel de intensidad del evento de blanqueamiento	41
Tabla 9. Nivel de intensidad de los huracanes basado en la escala de viento Saffir-Simpson	43
Tabla 10. Preguntas realizadas en los cuestionarios para conocer la percepción de la población local sobre las amenazas.....	46
Tabla 11. Especies susceptibles a SCTLD y su grado afectación.....	67
Tabla 12. Lista de especies que son poco susceptibles a la SCTLD	69
Tabla 13. Sensibilidad al blanqueamiento en base a la composición de especies de coral.....	80
Tabla 14. Población humana cercana a los arrecifes de coral.....	92
Tabla 15. Descripción de las amenazas que afectan a los arrecifes coralinos	92
Tabla 16. Incidentes relacionados al derrame de hidrocarburos en la Península de Yucatán	96
Tabla 17. Listado de encallamientos ocurridos en la Península de Yucatán.....	97
Tabla 18. Información recibida por parte de la CONANP por medio de correo electrónico	99
Tabla 19. Información recibida por parte de la CONANP a través del INAI	100
Tabla 20. Amenazas que han afectado la salud arrecifal del Banco de Campeche	101
Tabla 21. Tasa de cambio en la cobertura de coral.....	104
Tabla 22. Principales amenazas percibidas por región de acuerdo con cada grupo encuestado...	112
Tabla 23. Organizaciones y sitios de restauración en las diferentes regiones de Yucatán y Quintana Roo	120

Índice de figuras

Figura 1. Número de permisos de pesca, embarcaciones autorizadas y unidades económicas de pesca en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo	24
Figura 2. Tipo de pesca realizada en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.....	25
Figura 3. Número de habitaciones en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo de los años 1992-2021	29
Figura 4. Número de turistas en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo de los años 1992 a 2021	29

Figura 5. Área de estudio con ecosistemas coralinos	33
Figura 6. Arrecifes de la Península de Yucatán	35
Figura 7. Indicadores de salud arrecifal coral, macroalgas, peces, peces herbívoros y peces comerciales.....	37
Figura 8. Colonia de coral con blanqueamiento	42
Figura 9. Mapa de la cobertura promedio de coral, macroalgas, biomasa de peces herbívoros y comerciales.....	50
Figura 10. Cobertura promedio de coral al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	52
Figura 11. Cobertura promedio de macroalgas al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	53
Figura 12. Biomasa promedio de peces herbívoros al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	54
Figura 13. Biomasa promedio de peces comerciales al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	55
Figura 14. Índice de función arrecifal promedio al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	56
Figura 15. Riqueza promedio de corales al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	57
Figura 16. N1 de Hill de corales al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	58
Figura 17. N2 de Hill de corales al año de las regiones: Norte de Quintana Roo, Cozumel, Centro de Quintana Roo, Banco Chinchorro, y Sur de Quintana Roo	59
Figura 18. Boxplot de la comparación de los distintos indicadores ecológicos para cada región utilizada en este estudio.....	60
Figura 19. Boxplot del cambio de los distintos indicadores ecológicos en el tiempo para los arrecifes de Quintana Roo	61
Figura 20. Temperatura superficial de mar promedio anual de Cozumel de SIMAR y de NOAA	62
Figura 21. Temperatura superficial de mar promedio anual de 1981-2023 de las boyas SIMAR.....	63
Figura 22. Mapa de presencia de la enfermedad de pérdida de tejido del coral duro (SCTLD) en la zona de estudio.....	64
Figura 23. Prevalencia de enfermedades de 2005-2019 para el Caribe mexicano.....	65
Figura 24. Diagrama conceptual de la trayectoria a largo plazo de la funcionalidad física de los arrecifes del Caribe y los impactos recientes del SCTLD	66
Figura 25. Sensibilidad espacial respecto al SCTLD para la Península de Yucatán.....	68
Figura 26. máximo valor de DHW observado en toda la serie de tiempo (magnitud de exposición al estrés por calor).....	71
Figura 27. Número de eventos con exposición al riesgo de blanqueamiento	72
Figura 28. Número de eventos con exposición de riesgo de mortalidad	72
Figura 29. Año en el que se presentó la máxima exposición al estrés por calor en el Caribe y Banco de Campeche	74

Figura 30. Estrés por calor en los eventos de 2005, 2015, 2016, 2019 y 2020	75
Figura 31. Series de tiempo de los máximos DHW observados en los diferentes arrecifes	76
Figura 32. Proyecciones de estrés por calor y probabilidad de eventos de blanqueamiento para los arrecifes de la Península de Yucatán	78
Figura 33. Sensibilidad espacial respecto al blanqueamiento para los arrecifes de la Península de Yucatán	81
Figura 34. Tasa de cambio a diferentes intensidades de velocidad de viento de huracanes	83
Figura 35. Colonias de coral de morfología ramosa de <i>Acropora palmata</i> sanas y rotas.....	83
Figura 36. Trayectoria de los huracanes que pasaron entre 1980-2023 en la península de Yucatán	84
Figura 37. Huracanes cuya trayectoria ha pasado por la Península de Yucatán de 1980-2023 en un rango de 30 km	85
Figura 38. Exposición de las subregiones de la Península de Yucatán a las distintas categorías de huracán de 1980-2023	85
Figura 39. Vulnerabilidad de las diferentes morfologías de corales a los huracanes	87
Figura 40. Sensibilidad espacial respecto a los huracanes para los arrecifes de la Península de Yucatán	88
Figura 41. Densidad poblacional humana en 100m ² en los años 2000 y 2020.....	91
Figura 42. Diferencia en densidad poblacional humana.....	91
Figura 43. Amenazas que han afectado la salud arrecifal del Caribe Mexicano.....	103
Figura 44. Tasa de cambio de cobertura de coral después del paso de un huracán	109
Figura 45. Estado de la Península de Yucatán que abarca el área de estudio de los de encuestados	110
Figura 46. Rango de edad que tienen los entrevistados.....	110
Figura 47. Rango de años durante los cuales los entrevistados han trabajado en los ecosistemas arrecifales	111
Figura 48. Percepción que tienen los entrevistados sobre de la condición actual de los arrecifes de coral	111
Figura 49. Principales amenazas percibidas para el estado de Campeche.....	113
Figura 50. Campos petroleros de Pemex en la Sonda de Campeche.....	114
Figura 51. principales amenazas percibidas para el estado de Yucatán	115
Figura 52. Principales amenazas percibidas para el estado de Quintana Roo.....	116
Figura 53. Alternativas propuestas para la protección de los arrecifes de la Península de Yucatán	117
Figura 54. <i>Acropora palmata</i> restaurada por Oceanus en arrecife Jardines en Puerto Morelos, Norte de Quintana Roo	119
Figura 55. Proyectos de restauración establecidos en la Península de Yucatán	124
Figura 56. Brigadistas capacitados para acciones de restauración en la Península de Yucatán.....	124
Figura 57. Áreas Naturales Protegidas con porción marina de la Península de Yucatán.....	126

FIGURA 58. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE DOS GRUPOS DE PECES COMERCIALES BAJO DISTINTOS RANGOS DE PROTECCIÓN DE ANP	127
Figura 59. Presupuesto, años de establecimiento, y área marina bajo protección para 12 áreas naturales protegidas con porción marina del Caribe mexicano	128
Figura 60. Escenarios futuros de la cobertura de coral del Caribe Mexicano considerando tres escenarios de manejo de ANP	129
Figura 61. Promedio mensual de 1981-2023 de la temperatura superficial nocturna del mar para las 26 boyas oceanográficas de SIMAR	150
Figura 62. Promedio anual de 1993-1998, 2022-2023 del pH superficial del mar para 25 boyas oceanográficas de SIMAR	151
Figura 63. Promedio anual de 1993-1998, 2022-2023 del Fosfato disuelto en la superficie marina (PO4) [mg/L] para 26 boyas oceanográficas de SIMAR	152
Figura 64. Promedio anual de 1993-1998, 2022-2023 de Nitrato disuelto en la superficie marina (NO3) [mg/L] para 26 boyas oceanográficas de SIMAR.....	153
Figura 65. Comparación de cobertura de coral entre las distintas regiones.	166
Figura 66. Comparación de cobertura de macroalgas entre las distintas regiones.....	166
Figura 67. Comparación de la biomasa de herbívoros entre las distintas regiones.	167
Figura 68. Comparación de la biomasa de peces comerciales entre las distintas regiones.	167
Figura 69. Comparación de riqueza de especies entre las distintas regiones.	168
Figura 70. Comparación del N1 de Hill entre las distintas regiones.	168
Figura 71. Comparación del N2 de Hill entre las distintas regiones.	169
Figura 72. Comparación del IFA entre las distintas regiones.	169
Figura 73. Comparación de cobertura de coral en el tiempo para Quintana Roo.	170
Figura 74. Comparación de cobertura de macroalgas en el tiempo para Quintana Roo.	170
Figura 75. Comparación de la biomasa de herbívoros en el tiempo para Quintana Roo.	171
Figura 76. Comparación de la biomasa de peces comerciales en el tiempo para Quintana Roo...	171
Figura 77. Comparación de riqueza de especies en el tiempo para Quintana Roo.	172
Figura 78. Comparación del N1 de Hill en el tiempo para Quintana Roo.	172
Figura 79. Comparación del N2 de Hill en el tiempo para Quintana ROO.	173
Figura 80. Comparación del IFA en el tiempo para Quintana Roo.....	173

Siglas y acrónimos

AGRRRA	Atlantic Gulf Rapid Reef Assessment
ANP	Área Natural Protegida
BARCOLAB	Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación
CNH	Comisión Nacional de Hidrocarburos
Cinvestav	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
COBI	Comunidad y Biodiversidad
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONAPESCA	Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca
CONAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CORALIUM	Laboratorio de Investigación Integral para la Conservación de Arrecifes
CRIAP	Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera
CRIS	Caribbean Reef Information System
DHW	Degree Heating Weeks / Indicador de Semanas de Calor
FAO	Food and Agriculture Organization
FMCN	Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza
HRI	Healthy Reefs Initiative
INAI	Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales
INAPESCA	Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPN	Instituto Politécnico Nacional
LEEAC	Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos
LIT	Línea Intercepta
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration/Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
PIT	Punto Intercepto

PROCER	Programa de Conservación de Especies en Riesgo
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
RHI	Reef Health Index
SAM	Sistema Arrecifal Mesoamericano
SCTLD	Stony Coral Tissue Loss Disease
SEMAR	Secretaría de Marina
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMAR	Sistema de Información y Análisis Marino Costero
UADY	Universidad Autónoma de Yucatán

Resumen

El presente documento sintetiza los resultados de la consultoría “Estudio de prefactibilidad climática para evaluar la vulnerabilidad de ecosistemas de arrecifes de coral en Campeche, Quintana Roo y Yucatán”. La consultoría tuvo como objetivo realizar un diagnóstico exhaustivo de los arrecifes de coral en Campeche, Yucatán, y Quintana Roo, con enfoque en sus servicios ecosistémicos y su vulnerabilidad ante factores de estrés climático y no climático. La información recopilada será esencial para informar la toma de decisiones y desarrollar estrategias de conservación y adaptación efectivas.

La metodología empleada se basó en un enfoque integral que incorpora diversas estrategias. En primer lugar, se realizó una exhaustiva recopilación de datos relacionados con los arrecifes de coral en la región de estudio. Esto implicó la compilación de información geográfica y ecológica sobre los arrecifes, así como datos históricos sobre las condiciones y los indicadores climáticos que han afectado a estos ecosistemas. También se realizó una identificación de las mayores amenazas que podrían afectar estos ecosistemas, y se realizó un análisis minucioso de una serie de indicadores climáticos para comprender cómo los patrones y las tendencias climáticas podrían haber influido en la salud de los arrecifes de coral; estos indicadores climáticos se compararon con datos de la salud de los arrecifes para evaluar las posibles correlaciones.

La metodología incluyó la aplicación de instrumentos de colecta de información para incorporar las percepciones de la población local. Los conocimientos tradicionales y las opiniones de quienes viven cerca de los arrecifes de coral son invaluableles para comprender el panorama completo. Para conocer la percepción de los actores que están involucrados directa e indirectamente con los arrecifes de Yucatán, Campeche y Quintana Roo se llevaron a cabo entrevistas y encuestas a grupos focales, lo que añadió una dimensión social importante al estudio. De la misma manera, el aporte que los expertos locales dieron mediante la retroalimentación de los resultados le brindó mayor robustez al presente trabajo.

Los arrecifes de coral han experimentado una alarmante disminución de cobertura y diversidad de corales constructores de arrecifes. Esta degradación se atribuye a factores tanto globales como locales, entre estos el desarrollo costero, la contaminación, la pérdida de peces herbívoros, las enfermedades coralinas y el cambio climático. La salud de los arrecifes coralinos en la Península de Yucatán se evaluó

mediante diversos indicadores ecológicos. En total se recopiló información de 205 sitios en diferentes regiones y se analizó la cobertura de corales y macroalgas carnosas, así como la biomasa de peces herbívoros y comerciales. Para poder conocer la condición reciente del estado de los arrecifes se consideraron datos de 2021 para el Caribe y de 2016 para el Banco de Campeche. Además, se consideraron los parámetros de calificación que la Iniciativa de Arrecifes Saludables (HRI) utiliza para calificar el estado de los arrecifes.

En términos generales, se observa una elevada cobertura de macroalgas carnosas en todas las regiones de la Península de Yucatán, lo que indica condiciones preocupantes de contaminación y entrada de nutrientes provenientes de la costa hacia los arrecifes. Los arrecifes en Yucatán y el Banco de Campeche presentan una cobertura de coral aceptable, mientras que en el Caribe Mexicano la cobertura de coral es de mala a buena en la mayoría de las regiones. Al evaluar la condición de las comunidades íctica, se observó que la biomasa de peces herbívoros presenta variaciones significativas entre las diferentes regiones. Cozumel destaca por tener valores buenos, indicando una condición relativamente saludable, pero en la mayoría de las otras regiones la biomasa de peces herbívoros es baja, lo que resalta la necesidad de implementar medidas de conservación y manejo pesquero. En comparación, la biomasa de peces comerciales es mayor en todas las regiones. Sin embargo, es esencial mantener un enfoque sostenible para la pesca comercial y seguir promoviendo la conservación y el consumo sustentable.

En cuanto a los factores climáticos se observó que el estrés térmico y los huracanes presentan una grave amenaza para los arrecifes de la región. La exposición al estrés por calor es un factor preocupante que puede tener un impacto significativo en los arrecifes de coral, especialmente en términos de blanqueamiento. Una zona notable con una mayor exposición a valores elevados de estrés por calor es el Banco de Campeche en Campeche, mientras que en el estado de Quintana Roo se han identificado regiones con una exposición severa al estrés por calor. Estas regiones incluyen la parte central, como Sian Ka'an, así como el sur y, especialmente, el Banco Chinchorro. En estos sitios, los corales han estado expuestos a condiciones extremas que pueden resultar en una alta mortalidad de los corales. De igual forma las distintas proyecciones a futuro indican que los arrecifes de la región de la Península de Yucatán enfrentan un futuro incierto y desafiante debido al estrés por calor y la probabilidad creciente de eventos de blanqueamiento bajo diferentes escenarios de calentamiento global.

Los huracanes son fenómenos que al pasar por los arrecifes pueden provocar la destrucción de colonias de coral. En el Caribe los huracanes de categorías 4 y 5 causan una disminución abrupta en la cobertura de coral vivo, que puede variar entre 15% y 60%. A mayor cobertura de coral, la pérdida puede ser mayor sin importar la categoría del huracán; de igual forma la composición de las especies de coral puede influir ya que las especies ramosas son más propensas a romperse. En cuanto a las zonas con mayor vulnerabilidad, Quintana Roo es la zona que ha presentado un mayor impacto de huracanes de categorías 4 y 5, y mayor cobertura de especies de coral ramosas que son más susceptibles a la ruptura por tormentas, mientras que el Banco de Campeche, tanto en la zona de Yucatán como de Campeche, han presentado solamente tormentas tropicales o huracanes categoría 1 en un periodo de 43 años (1980-2023). Junto con el aumento de la temperatura superficial del mar, está pronosticado el aumento y la severidad de los huracanes; se estima que incrementarán entre 1 y 10% conforme al aumento de la temperatura a nivel mundial lo que puede ocasionar graves daños a los ecosistemas coralinos de la región.

Otra amenaza, que no es climática, pero se ve influenciada por factores de cambio climático es la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus siglas en inglés). Esta enfermedad afecta principalmente a especies masivas y a los corales cerebro; desde 2018 ha causado una alta mortalidad de corales en los arrecifes de Quintana Roo. A pesar de que para el Banco de Campeche no se ha reportado avistamiento del SCTLD, la composición de especies coralinas que se presenta en esos arrecifes los vuelve sumamente vulnerables en caso de que la enfermedad llegue a esas zonas, lo que podría ocasionar una alta mortalidad de los corales.

Existen distintas actividades antropogénicas a partir de las cuales pueden suceder accidentes que dañen la salud arrecife; en este caso los derrames de hidrocarburos representan un factor de estrés latente para los arrecifes del Banco de Campeche, debido a que es una zona petrolera con numerosos pozos y plataformas activas. Otras situaciones que son preocupantes son los encallamientos, ya que a pesar de que el daño es a nivel local, la severidad del daño es muy alta.

Otro factor no climático que representa una amenaza constante y creciente para los arrecifes es el desarrollo costero desmedido, el cual se ve reflejado en el incremento de las construcciones hoteleras, así como en el aumento de las poblaciones costeras. Desde 2000 a 2020, las ciudades más reconocidas, como Mérida, Cancún y Playa del Carmen, presentaron una creciente densidad poblacional, y también se observó una densidad poblacional media en las poblaciones cercanas a las carreteras. El aumento

en la densidad poblacional y la expansión urbana también pueden ejercer presión sobre los servicios públicos y la infraestructura, así como en la calidad de vida de los residentes locales. Por tanto, es esencial abordar estos cambios demográficos y su impacto en el entorno natural para garantizar un desarrollo sostenible y equitativo en la Península de Yucatán. La planificación y la ejecución adecuadas son fundamentales para evitar problemas de sobreexplotación de recursos, pérdida de biodiversidad y degradación ambiental, para proteger así el patrimonio natural y cultural de esta región tan valiosa.

A la par del declive en la cobertura, en la última década ha tomado importancia el establecimiento de proyectos de restauración en los arrecifes de coral. Estos esfuerzos se han concentrado especialmente en la zona norte de Quintana Roo, donde existen diversos grupos de trabajo, que involucran a instituciones académicas y de investigación, prestadores de servicios turísticos, gobierno y organizaciones de la sociedad civil. Estos actores han unido esfuerzos en diversas ocasiones para restaurar distintas áreas arrecifales en la región; existen más de 50 brigadistas capacitados para atender acciones de rescate en caso de tormentas y de restauración. Muchas veces estas acciones están limitadas por los recursos económicos disponibles.

Con base al análisis de los datos climáticos, los indicadores biológicos y las percepciones locales descritas anteriormente, se pudo realizar el diagnóstico de los arrecifes de la Península de Yucatán. Dicho diagnóstico abarcó la vulnerabilidad que tienen ante distintos factores climáticos y no climáticos, como huracanes, estrés térmico y densidad poblacional. A partir de esto, se formularon recomendaciones para la conservación de estos ecosistemas; entre estas destacan la creación de áreas marinas protegidas, la implementación de prácticas de pesca sostenible, la reducción de la contaminación costera y la sensibilización de las comunidades.

Abstract

The present document summarizes the results of the consultancy "Climate prefeasibility study to assess the vulnerability of coral reef ecosystems in Campeche, Quintana Roo, and Yucatan." The objective of the consultancy was to conduct a comprehensive diagnosis of coral reefs in Campeche, Yucatan, and Quintana Roo, focusing on their ecosystem services and vulnerability to climate and non-climate stressors. The collected information will be essential to inform decision-making and develop effective conservation and adaptation strategies.

The methodology used was based on a comprehensive approach that incorporates various strategies. First, an exhaustive compilation of data related to coral reefs in the study region was conducted. This involved the compilation of geographic and ecological information about the reefs, as well as historical data on climate conditions and climate indicators that have affected these ecosystems. An identification of the major threats that could affect these ecosystems was also conducted, and a thorough analysis of a series of climate indicators was conducted to understand how climate patterns and trends could have influenced the health of coral reefs. These climate indicators were compared with reef health data to assess correlations. The methodology also included the application of data collection instruments to incorporate the perceptions of the local population. Traditional knowledge and opinions of those living near coral reefs are invaluable for understanding the full picture. To understand the perception of the actors who are directly and indirectly involved with the reefs in Yucatán, Campeche, and Quintana Roo, interviews and surveys were conducted with focus groups, which added an important social dimension to the study. Likewise, the contribution of local experts through feedback on the results provided greater robustness to the present work.

Coral reefs have experienced an alarming decrease in cover and diversity of reef-building corals. This degradation is attributed to both global and local factors, including coastal development, pollution, loss of herbivorous fish, coral diseases, and climate change. The health of coral reefs in the Yucatan Peninsula was evaluated using various ecological indicators. A total of 205 sites in different regions were surveyed, analyzing coral and fleshy macroalgae cover, as well as the biomass of herbivorous and commercial fish. To assess the recent condition of the reefs, data from 2021 for the Caribbean and 2016 for the Campeche Bank were considered. In addition, the rating parameters used by the Healthy Reefs Initiative (HRI) to assess reef status were used.

Overall, high fleshy macroalgae cover was observed in all regions of the Yucatan Peninsula, indicating concerning conditions of pollution and nutrient input from the coast to the reefs. Reefs in Yucatan and the Campeche Bank show acceptable coral cover, while in the Mexican Caribbean, coral cover ranges from poor to good in most regions. When evaluating the condition of fish communities, significant variations in herbivorous fish biomass were observed among the different regions. Cozumel stands out for having good values, indicating a healthy condition, but in most other regions, herbivorous fish biomass is low, highlighting the need for conservation and fisheries management measures. In comparison, commercial fish biomass is higher in all regions. However, it is essential to maintain a sustainable approach to commercial fishing and continue promoting conservation and sustainable consumption.

Regarding climatic factors, it was observed that thermal stress and hurricanes pose a serious threat to the reefs of the region. Exposure to heat stress is a worrying factor that can have a significant impact on coral reefs, especially in terms of bleaching. A notable area with higher exposure to elevated heat stress values is the Campeche Bank in Campeche, while in the state of Quintana Roo, regions with severe exposure to heat stress have been identified. These regions include the central part, such as Sian Ka'an, as well as the south and especially the Chinchorro Bank. In these sites, corals have been exposed to extreme conditions that can result in high coral mortality. Similarly, various future projections indicate that the reefs in the Yucatan Peninsula region face an uncertain and challenging future due to heat stress and the increasing probability of bleaching events under different global warming scenarios.

Hurricanes are phenomena that, when passing through reefs, can cause the destruction of several coral colonies. In the Caribbean, Category 4 and 5 hurricanes cause a sudden decrease in live coral cover, which can vary between 15% and 60%. The loss can be even greater with higher coral cover, regardless of the hurricane category. Additionally, the composition of coral species can also influence the impact, as branching species are more prone to breakage. Regarding the areas with higher vulnerability, Quintana Roo is the region that has faced the greatest impact from Category 4 and 5 hurricanes, and has a higher cover of branching coral species, which are more susceptible to storm damage. In contrast, the Campeche Bank, both in the Yucatan and Campeche regions, has only experienced tropical storms or Category 1 hurricanes in a 43-year period (1980-2023). Along with the increase in sea surface temperature, the increase and severity of hurricanes are predicted. It is estimated that hurricanes will increase by 1 to 10% as global temperatures rise, which can cause severe damage to the coral ecosystems in the region. Another non-climatic threat, but influenced by climate change factors, is the Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD). This disease affects massive coral species and brain corals, and since 2018, it has caused high coral mortality in the reefs of Quintana Roo. Although no cases of SCTLD have been reported in the Campeche Bank, the composition of coral species in those reefs makes them highly vulnerable if the disease were to reach those areas, which could result in high coral mortality.

There are different anthropogenic activities through which accidents can occur that damage the health of the reef. In this case, oil spills represent a latent stress factor for the reefs of the Campeche Bank, it is an oil zone with numerous wells and active platforms. Other concerning situations are ship groundings, as despite the damage being localized, the severity of the damage is extremely high.

Another non-climatic factor that poses a constant and growing threat to the reefs is excessive coastal development, which is reflected in the increase in hotel constructions, as well as the growth of coastal populations. From 2000 to 2020, the most renowned cities such as Mérida, Cancún, and Playa del Carmen, experienced a growing population density, and there was also a medium population density observed in communities near highways. The increase in population density and urban expansion can also put pressure on public services, infrastructure, and the quality of life of residents. Therefore, it is essential to address these demographic changes and their impact on the natural environment to ensure sustainable and equitable development in the Yucatán Peninsula. Proper planning and execution are crucial to avoid problems of resource overexploitation, biodiversity loss, and environmental degradation, to protect the natural and cultural heritage of this valuable region.

Alongside the decline in cover, the establishment of coral reef restoration projects has gained importance in the last decade. These efforts have focused particularly on the northern zone of Quintana Roo, where various working groups involving academic and research institutions, tourist service providers, the government, and civil society organizations have been involved. These actors have joined forces on several occasions to restore different reef areas in the region; there are over fifty trained people from the community brigades, to conduct rescue and restoration actions in case of storms. Many times, these actions are limited by the available economic resources.

Based on the analysis of climate data, biological indicators, and local perceptions described above, the diagnosis of the reefs of the Yucatan Peninsula was possible. This diagnosis addressed the vulnerability to various climatic and non-climatic factors, such as hurricanes, thermal stress, and population density. Based on this, key recommendations were formulated for the conservation of these vital ecosystems. These include the creation of protected marine areas, the implementation of sustainable fishing practices, the reduction of coastal pollution, and community awareness.

I. Introducción

Los arrecifes de coral son los ecosistemas marinos con mayor diversidad en el mundo; sin embargo, en las últimas décadas los arrecifes coralinos han presentado un importante declive en la cobertura coralina (Jackson et al., 2014). Especialmente, los arrecifes del Caribe pertenecientes al Sistema Arrecifal Mesoamericano han presentado una importante disminución en la abundancia de corales constructores de arrecifes, lo que ha derivado en una pérdida en la cobertura y la complejidad arrecifal desde 1980 (Álvarez-Filip et al., 2009; Contreras-Silva et al., 2020; Gardner et al., 2003). Diversos factores han influido en este proceso de degradación como el desarrollo costero desmedido, la contaminación de las aguas costeras (Arias-González et al., 2017; Suchley y Álvarez-Filip, 2018), la pérdida de herbívoros, las enfermedades coralinas y, tal vez, el más complejo de ellos es el cambio climático.

Este ecosistema enfrenta un estrés constante debido a factores globales y locales. El cambio climático, especialmente el aumento de la temperatura del océano provoca blanqueamiento de coral y pérdida de diversidad (Hughes et al., 2018). Factores locales, como la sobrepesca y la contaminación, también contribuyen a la pérdida de especies y cambios en el ecosistema. Estas perturbaciones afectan la resiliencia de los arrecifes, haciéndolos más vulnerables a futuros impactos. Evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral es crucial para identificar riesgos y desarrollar estrategias de conservación efectivas. Según el IPCC (2007), la vulnerabilidad es el grado en que un sistema puede hacer frente a los efectos del cambio climático, lo cual es una función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y la exposición que tienen dicho sistema junto con su sensibilidad y su capacidad de adaptación. Por lo cual comprender estos componentes ayuda a proteger y fortalecer la resiliencia de estos ecosistemas ante el cambio climático y otros impactos humanos (Mumby et al., 2014), volviéndose una herramienta esencial para garantizar la supervivencia de los arrecifes de la Península de Yucatán.

Los arrecifes coralinos no solo albergan una gran biodiversidad, sino que también brindan importantes servicios ecosistémicos al ser humano. Entre estos servicios se encuentra la protección de la costa, el suministro de alimentos, la generación de empleo y una importante contribución a los ingresos económicos derivados de actividades como la pesca y el turismo. Por lo tanto, la investigación con respecto a ellos no debe limitarse sólo al ámbito ecológico sino incluir la percepción social que tienen los actores claves que se relacionan con este ecosistema como los prestadores de servicios turísticos, los pescadores, los pobladores, los turistas, los hoteleros, la academia y los guardaparques.

Por lo anterior, proyectos como "Sustainable Communities for Climate Action in the Yucatán Península (ACCIÓN Yucatán)" del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN) permitirán fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático en las comunidades de la Península de Yucatán, a través de la implementación de prácticas sostenibles en los sectores de interés del proyecto, así como en la toma de decisiones de sus principales actores. Parte del proceso de preparación del proyecto ACCIÓN es esta consultoría que se enfocará a realizar un diagnóstico para los ecosistemas de arrecifes de coral en Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

II. Objetivos de la consultoría

Realizar un diagnóstico para los ecosistemas de arrecifes de coral en Campeche, Quintana Roo y Yucatán para caracterizar los servicios ecosistémicos que proveen y evaluar su vulnerabilidad ante los factores de estrés climático.

II.1. Objetivos específicos

1. Evaluar el estado actual de los arrecifes de coral en la región, incluidos su salud, diversidad, cobertura y resiliencia ante los factores de estrés climático.
2. Caracterizar los servicios ecosistémicos que proveen los ecosistemas de arrecife de coral.
3. Identificar los principales factores de estrés climático que afectan a los arrecifes de coral en la región, incluidos aumento de la temperatura del agua, huracanes, acidificación del océano y aumento del nivel del mar, y cuáles han sido sus impactos históricos sobre los arrecifes de coral.
4. Identificar los principales factores de estrés no climáticos que afectan a los arrecifes de coral en la región.
5. Analizar el impacto de los factores de estrés climático en los arrecifes de coral de la región, incluidos pérdida de biodiversidad, erosión del arrecife, reducción de la capacidad de los arrecifes de coral para proteger la costa de erosión e inundaciones, entre otros.
6. Evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas de arrecifes de coral de la región.
7. Identificar los principales desafíos y limitaciones, así como iniciativas existentes para la implementación de estrategias de adaptación en la región relacionadas con los ecosistemas de arrecife de coral.

III. Caracterización de los servicios ecosistémicos proporcionados y evaluación de su importancia económica y ambiental en el área de incidencia del proyecto ACCIÓN

Se hizo un análisis de la bibliografía relativa a los servicios ecosistémicos que proporcionan los arrecifes y la importancia económica y ambiental para la Península de Yucatán. Los servicios ecosistémicos en los sistemas arrecifales son aquellos que tienen un beneficio para los seres humanos, y pueden dividirse en cuatro categorías principales: servicios de abastecimiento, de regulación, de soporte y culturales (Tabla 1; MEA, 2005).

En los arrecifes de la Península de Yucatán el servicio de abastecimiento es principalmente la pesca. El servicio de regulación es la protección que brinda el arrecife contra el oleaje y a eventos extremos como los huracanes. Dentro de los servicios de soporte tenemos el hábitat que los arrecifes crean para miles de especies, así como los ciclos biogeoquímicos; en los servicios culturales, se encuentra el turismo. A continuación, se describe cada uno de ellos (Woodhead et al. 2019).

TABLA 1. PRINCIPALES SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS ARRECIFES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Categoría de servicio ecosistémico	Servicios ecosistémicos	Descripción	Campeche	Yucatán	Quintana Roo
Abastecimiento	Pesca	Servicios y beneficios obtenidos de la pesca en los arrecifes; se aprovecha para alimentación	En 2022 se capturaron 47,884,806 kg de pescado con un valor de \$1,932 millones de pesos. Las principales especies fueron pulpo, jurel, caracol y camarón. Fue el estado de la Península de Yucatán con más	En 2022, se registraron 45,290,398 kg de pesca con un valor de \$3,286 millones de pesos. Las especies que más se registraron fueron pulpo, mero, rubia y langosta. Es el estado de la región de la	Es el estado con la menor pesca y el menor valor, con 1,815,734 kg en 2022 y un valor de \$292 millones de pesos. La pesca de langosta es la de mayor importancia comercial.

Categoría de servicio ecosistémico	Servicios ecosistémicos	Descripción	Campeche	Yucatán	Quintana Roo
			kilogramos de pesca.	Península con el mayor valor de la pesca.	
Regulación	Protección costera	Brindan protección costera contra las olas y los fenómenos meteorológicos extremos.	En el periodo utilizado en este estudio (1980-2023), en el estado se han registrado tormentas y huracanes categoría 1. Pero utilizando un periodo de tiempo de 1851-2023, esta zona ha tenido el impacto de 17 huracanes categoría 1, 2 huracán categoría 2 y 1 huracán categoría 3.	En el periodo utilizado en este estudio (1980-2023) sólo se han registrado tormentas, afectando este estado. Pero utilizando un periodo de tiempo de 1851-2023, esta zona ha tenido el impacto de 2 huracanes categoría 1, 3 huracán categoría 2 y 1 huracán categoría 3.	Se reporta alta incidencia de huracanes categorías 4 y 5. El arrecife es capaz de atenuar la energía del oleaje de tormenta en 99%, (Blanchon et al. 2010) y económicamente reducen los daños anuales esperados de las tormentas en 42 millones de dólares a edificios y 20,8 millones de dólares para infraestructura hotelera (Reguero et al. 2019).
	Calidad de agua y ciclos biogeoquímicos	Servicios y beneficios obtenidos del ciclo de nutrientes y la calidad del agua.	El carbono (como carbonatos) que depositan las especies arrecifales como corales y otros miembros del ecosistema.		Se ha calculado que el arrecife produce 0.6 kg de carbonato de calcio por m2 al año.

Categoría de servicio ecosistémico	Servicios ecosistémicos	Descripción	Campeche	Yucatán	Quintana Roo
Soporte	Beneficios de la biodiversidad	Se obtienen al tener un ecosistema de arrecife diverso que puede sustentar otros servicios	Banco de Campeche presenta 2,057 especies, de importancia para la pesca y de ellas, 40 son corales duros (Torruco et al. 2012)		SAM alberga cerca de 3,331 especies marinas, entre las cuales se encuentran varias de importancia económica y presenta 50 especies de coral duro (Hernández-Landa, 2004).
	Hábitat	Se obtienen al tener un ecosistema de arrecife que proporciona un hábitat clave para otros organismos	Los arrecifes presentan estructura tridimensional que proporciona importantes refugios para las especies (Graham & Nash, 2013) y son el hábitat para especies en diferentes etapas de vida (Ortiz & Tissot, 2012).		
Culturales	Turismo	Servicios y beneficios obtenidos para generar experiencia humana recreativa.	En 2021, el estado recibió 1,250,232 turistas nacionales y extranjeros (INEGI 2023).	En 2021, el estado recibió 1,938,002 turistas nacionales y extranjeros (INEGI, 2023).	En 2021, el número de turistas fue de 12,353,910 (INEGI 2023). Tan solo Isla Cozumel tiene un valor para los turistas de 5,493 millones de pesos al año (CONANP-GIZ, 2017).

III.1. Pesca

La pesca es una de las principales actividades de la Península de Yucatán, en especial en Campeche y Yucatán. Se obtuvieron los datos registrados por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) en el anuario y en la base de datos de Acuacultura y Pesca, que integran la información más relevante en materia de acuacultura y pesca,

relativa a los principales aspectos económicos y sociales (CONAPESCA, 2022).

En Campeche en el año 2022 se pescaron 47,884,806 kg con un valor de \$1,932 millones de pesos y fue el estado de la Península de Yucatán con más kilogramos pescados. Las principales especies fueron: pulpo, jurel, caracol y camarón. En Yucatán, en 2022, se registraron 45,290,398 kg de pesca con un valor de \$3,286 millones de pesos, por lo que fue el estado de la región con el mayor valor de la pesca. Las especies que más se registraron fueron pulpo, mero, rubia y langosta. Por último, en 2022 Quintana Roo fue el estado con la menor pesca y el menor valor, con 1,815,734 kg con un valor de \$292 millones de pesos; ese año la pesca de langosta tuvo la mayor importancia comercial. En los tres estados el destino final de la pesca es el consumo humano y un pequeño porcentaje (menor al 1%) fue utilizado para uso industrial (CONAPESCA, 2022).

De acuerdo con la información de Pescandodatos (Casa Natura, 2023) Campeche y Yucatán son los que tienen el mayor número de permisos para pesca (Fig. 1), mientras que Yucatán posee el mayor número de embarcaciones de la región para realizar este tipo de actividades. En contraste, Quintana Roo es el estado que posee el menor número de embarcaciones pesqueras autorizadas y por ende el menor número de unidades económicas asociadas a los permisos. Respecto a las artes de pesca, se tiene registrado que existen 18 artes distintas, siendo la pesca de escama marina y la de pulpo las que cuentan con un mayor número de permisos concesionados (Fig. 2).

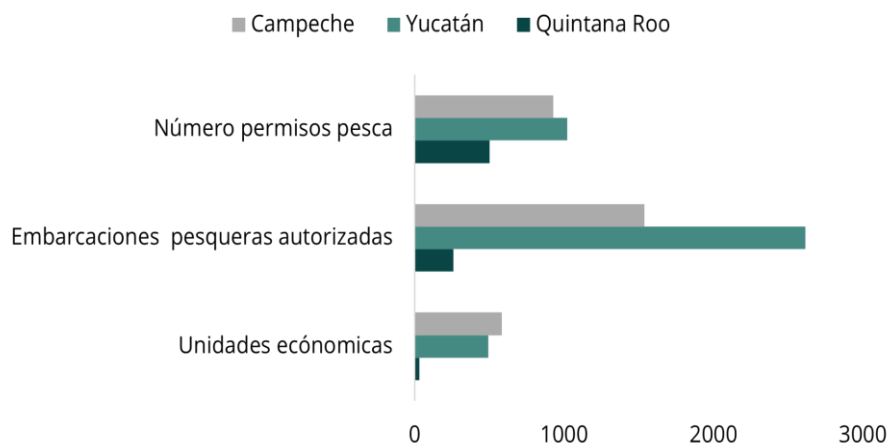


FIGURA 1. NÚMERO DE PERMISOS DE PESCA, EMBARCACIONES AUTORIZADAS Y UNIDADES ECONÓMICAS DE PESCA EN LOS ESTADOS DE CAMPECHE, YUCATÁN Y QUINTANA ROO

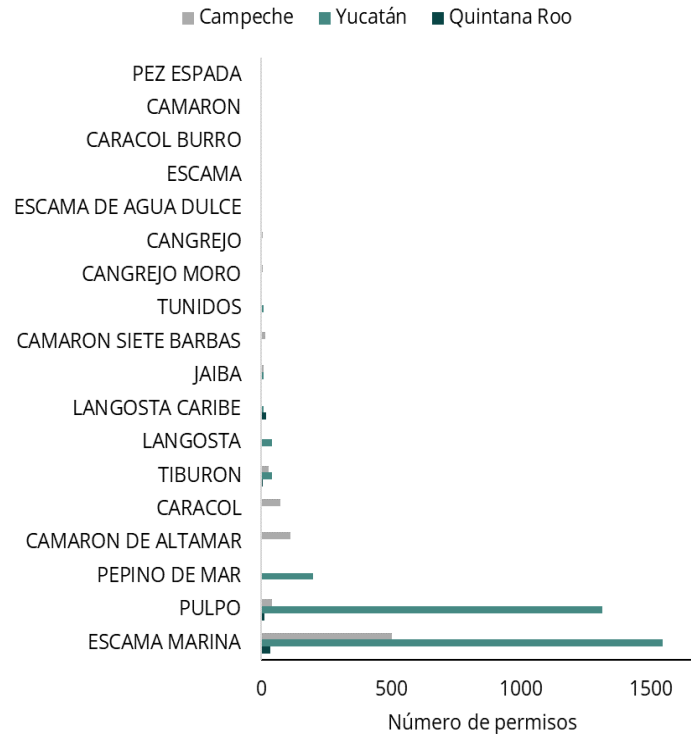


FIGURA 2. TIPO DE PESCA REALIZADA EN LOS ESTADOS DE CAMPECHE, YUCATÁN Y QUINTANA ROO

III.2. Protección de la línea de costa

Los arrecifes de coral con una barrera natural efectiva contra la energía de las olas, particularmente los arrecifes someros pueden reducir las olas en un 70% (Narayan et al., 2016), lo que ha permitido que las poblaciones humanas puedan asentarse en las costas. Esta protección es resultado de la alta complejidad estructural que tienen los arrecifes, lo que genera altas tasas de disipación de la energía de las olas (Lowe et al., 2005; Monismith et al., 2015), y brinda protección contra tormentas y huracanes. Estos fenómenos, en especial huracanes de las categorías 4 y 5, pueden ocasionar un declive de hasta el 10% en la cobertura de coral en los arrecifes (González-Barrios et al., 2023).

Para el caso de los estados de Campeche y Yucatán, en los últimos 43 años no se han registrado huracanes de las categorías 4 y 5; solamente han pasado tormentas y huracanes categoría 1 (Tabla 19). De igual forma, por la geografía de la Península estos no cuentan con una barrera arrecifal cercana a sus costas, que pueda aminorar la energía de las tormentas, por lo cual las poblaciones costeras se encuentran más expuestas a los impactos del viento y las olas.

El estado de Quintana Roo tiene arrecifes frente a su costa por lo que los arrecifes protegen a más de un millón de habitantes. Un claro ejemplo de la protección a la costa

se pudo observar en Puerto Morelos en 2005, donde está documentado que el arrecife fue capaz de atenuar la energía del oleaje de tormenta en un 99%, ante olas mayores a 13 m provocadas por el huracán Wilma (Blanchon et al. 2010). Sin embargo, los daños causados por el huracán Wilma se estimaron en 18,773 millones de pesos (CONAPRED, 2020). Uno de los sectores más afectados fue el turístico con pérdidas de 3,671 millones de pesos, pero también se vieron afectados sectores como la vivienda 360 millones de pesos e infraestructura del sector eléctrico 297 millones de pesos (García et al., 2006). Los daños hubieran sido mayores de no existir el arrecife frente a las costas de Quintana Roo.

Los beneficios de reducción de riesgos en el estado Quintana Roo por la presencia de arrecifes son significativos, por ejemplo, los arrecifes evitaron un 43% de daño adicional durante el huracán Dean en 2007 y actualmente reducen el riesgo para el 4.3% de la población, el 1.9% del capital construido y el 2.4% de la infraestructura hotelera, cada año. Los beneficios anuales de los arrecifes se estiman en 4,600 personas, previenen 42 millones de dólares en daños a edificios y 20.8 millones de dólares en daños a la infraestructura hotelera (Reguero et al. 2019).

III.3. Hábitat

Los arrecifes de coral forman una estructura tridimensional que proporciona importantes refugios para las especies como la langosta del Caribe (*Panulirus argus*), distintas especies de mero y pargo que son importantes para la economía pesquera (Graham & Nash, 2013) y proporcionan el hábitat para los organismos en diferentes etapas de vida (Ortiz & Tissot, 2012). Este servicio ecosistémico está presente en todos los arrecifes.

III.4. Beneficios de la biodiversidad

El Banco de Campeche presenta 2,057 especies y 136 de ellas están distribuidas en 6 grupos taxonómicos: corales duros (40), corales blandos (16), hidrozoarios (8), esponjas (59), anélidos poliquetos (5) y anémonas (8) (Torruco et al. 2012). Para el Banco de Campeche se han registrado menos especies que en el Caribe, ya que el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) alberga cerca de 3,331 especies marinas, entre las cuales se encuentran varias de importancia económica y presenta 50 especies de coral duro (Hernández-Landa, 2004).

III.5. Ciclos biogeoquímicos

Los arrecifes de coral participan en el ciclo de nutrientes marinos al absorber y reciclar los nutrientes presentes en el agua. Estos nutrientes son esenciales para el crecimiento de los organismos marinos y la salud de los ecosistemas. Además, los arrecifes normalmente se comportan como un sitio de secuestro de carbono desde la atmósfera. El dióxido de carbono entra al océano por difusión y se incorpora a los ecosistemas gracias a la fotosíntesis de algas y fitoplancton, y como carbonatos de origen animal, vegetal o químico (Kleypas et al., 2006). Para la zona de Quintana Roo se ha calculado que el arrecife produce $0.6 \text{ kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, lo que indica que en un metro cuadrado los corales y algas coralinas producen más de medio kilo de carbonatos al año (Molina-Hernández et al., 2020). Esto se debe a que el carbono (como carbonatos) que depositan las especies arrecifales como corales y otros miembros del ecosistema (como moluscos, esponjas, etcétera) permanece fijo en sus esqueletos incluso después que el organismo muere (Reyes-Bonilla, 2014).

III.6. Turismo

Los arrecifes coralinos atraen a un gran número de turistas por su valor estético. Al estado de Campeche, en 2021, llegaron 1,250,232 turistas nacionales y extranjeros en total. En ese mismo año, Yucatán recibió 1,938,002 turistas nacionales y extranjeros, y Quintana Roo recibió 12,353,910 (INEGI 2023). Tan solo en Cozumel, isla de Quintana Roo, el valor del arrecife para los turistas es de 5,493 millones de pesos al año (CONANP-GIZ, 2017). En un estudio que realizó la valoración de servicios ecosistémicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y del Área de Protección de Flora y Fauna Isla Cozumel determinó que los servicios de los arrecifes que tienen más valor en la Isla Cozumel son la protección a la costa frente a eventos meteorológicos extremos y el ciclo biogeoquímico, con un valor de 596 millones de pesos al año (CONANP-GIZ, 2017).

El turismo en la Península de Yucatán es una de las actividades más importantes. En México en 2020 el Producto Interno Bruto (PIB) del sector turístico aportó 7.5 % del PIB nacional (INEGI, 2023). A partir de la información reportada por el INEGI en el Anuario Estadístico y Geográfico (INEGI, 2023), se obtuvieron el número de cuartos de hotel de hoteles en los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo del año 2020 que corresponden a los municipios de las regiones del proyecto ACCIÓN. La región con el mayor número de hoteles es la G, al norte de Quintana Roo con 114,645 hoteles registrados. Se calculó la distancia aproximada que tienen los arrecifes a la costa,

siendo los arrecifes del Banco de Campeche los más alejados y los de Quintana Roo los más cercanos (Tabla 2).

TABLA 2. NÚMERO DE HABITACIONES DE HOTELES EN LAS REGIONES DEL PROYECTO ACCIÓN

Región proyecto ACCIÓN	Región usada en análisis de arrecifes	Número de habitaciones	Distancia aproximada de los arrecifes a la costa (km)
A	Banco de Campeche	4,117	200
B	Banco de Campeche	462	200
C	Banco de Campeche	2,549	200
D	Banco de Campeche en Yucatán	963	100
E	Banco de Campeche en Yucatán	348	100
F	Banco de Campeche en Yucatán	575	100
G	SIN REGIÓN	1,657	No hay arrecifes
G	Norte Quintana Roo	108,298	1-2
G	Cozumel	4,701	2
H	Centro de Quintana Roo	186	1-2
I	Sur de Quintana Roo	3,856	1-2
Otras islas	Banco Chinchorro	0	45

Nota: El número de habitaciones toma en cuenta hoteles y moteles

Fuente: Anuario Estadístico y Geográfico 2023.

Con base en el Sistema de Monitoreo DataTur (DATATUR, 2023), se obtuvo el número de habitaciones y el número de llegadas de turistas de los años 1992 a 2021 de los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Fig. 3 y 4). El estado de Quintana Roo es el estado que presenta más habitaciones de hoteles y el mayor número de turistas, en 2021, con 112,631 habitaciones de hotel y más de 12 millones de turistas nacionales y extranjeros.

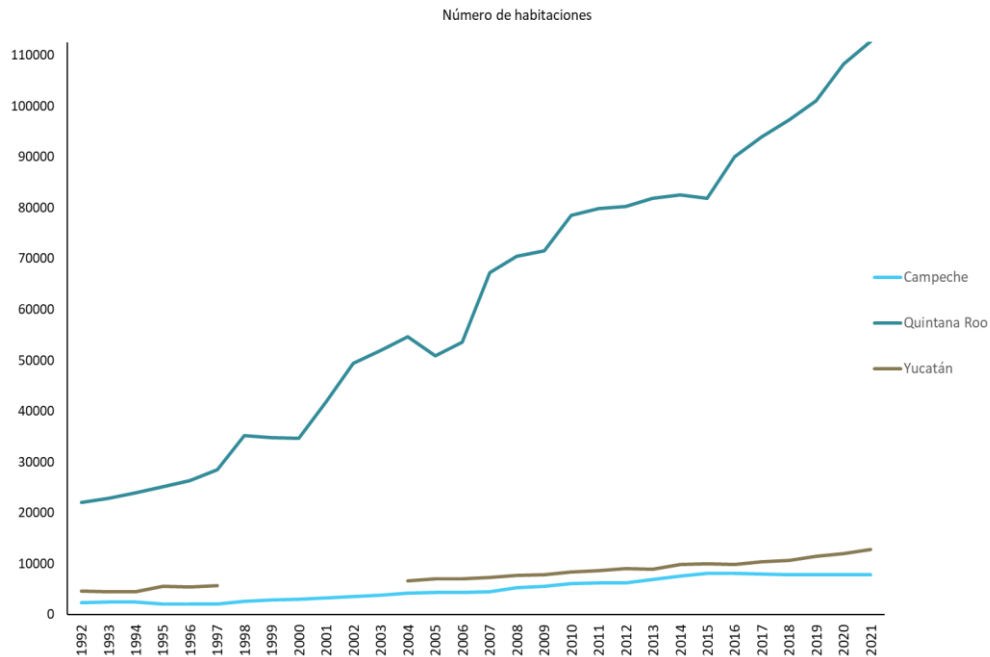


FIGURA 3. NÚMERO DE HABITACIONES EN LOS ESTADOS DE CAMPECHE, YUCATÁN Y QUINTANA ROO DE LOS AÑOS 1992-2021

Fuente: Sistema de Monitoreo DataTur.

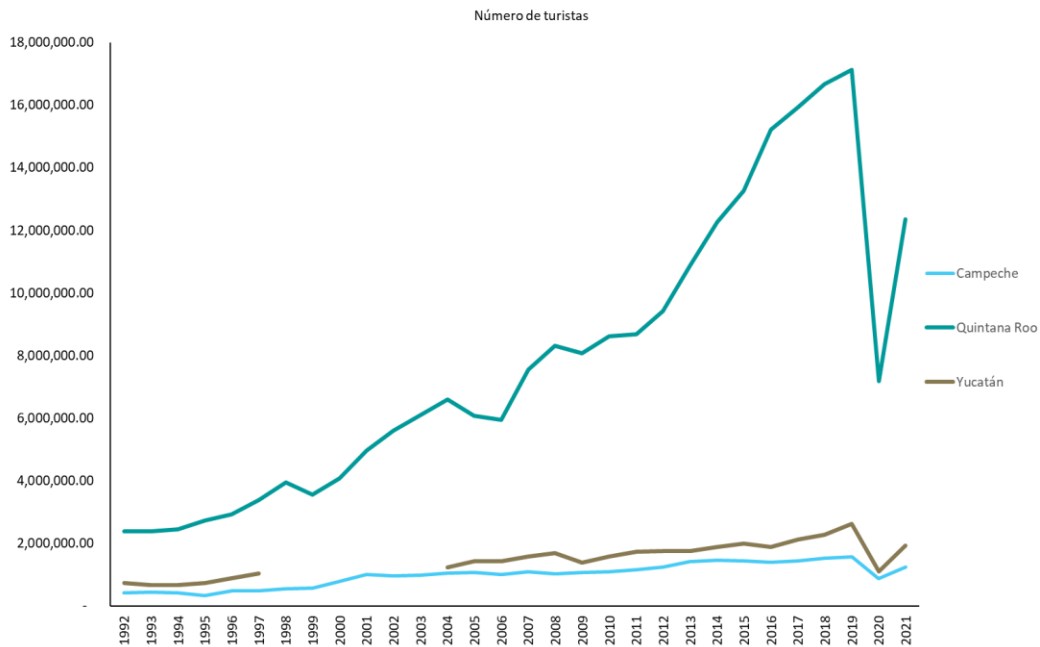


FIGURA 4. NÚMERO DE TURISTAS EN LOS ESTADOS DE CAMPECHE, YUCATÁN Y QUINTANA ROO DE LOS AÑOS 1992 A 2021

Nota: Fuente Sistema de Monitoreo DataTur

IV. Metodología

IV.1. Parámetros ecológicos

IV.1.1. Recopilación y sistematización de información de cobertura de coral, cobertura de macroalgas carnosas y biomasa de peces

Para los datos de Quintana Roo se utilizó la base de datos de Healthy Reefs Initiative (HRI) la cual tiene información de cobertura de coral, macroalgas carnosas y biomasa de peces herbívoros y comerciales del periodo 2006 a 2022 (<https://www.healthyreefs.org/cms/>). Para los datos del Banco de Campeche se utilizó la base de datos CRIS (Caribbean Reef Information System) de BARCOLAB (Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación) de la UNAM, que comprendía datos solo de 2016. Para aumentar el número de datos se realizó una búsqueda bibliográfica sistematizada para los arrecifes del Banco de Campeche, que incluyó datos de los arrecifes de Campeche y Yucatán, enfocada en artículos, proyectos y literatura gris sobre la salud de los ecosistemas arrecifales de Campeche y Yucatán. Se utilizaron palabras claves en los distintos buscadores. De igual forma se tuvo comunicación directa con distintos investigadores que pudieran tener información de relevancia para el proyecto. Cabe resaltar que para el Banco de Campeche se encontraron documentos, los cuales se encontraban protegidos y no estaban disponibles al público en general (ej. Jordán-Dahlgren 1997, 2002). Para cada documento sistematizado se extrajo la siguiente información:

- Tipo de referencia: artículo científico, reporte, libro, etc.
- Entidad federativa (Campeche, Yucatán, Quintana Roo)
- Año(s) que abarca el monitoreo
- Sitios que abarca el estudio
- Ubicación geográfica
- Metodología utilizada
- Datos de salud arrecifal (ej. cobertura de coral, macroalgas, abundancia de peces)

Para el caso de los artículos/reportes que no tenían la información de cobertura escrita, pero contaban con gráficos disponibles, se procedió a extraer la información de cada gráfica con la ayuda de la herramienta WebPlotDigitizer V.3.8. Una vez extraída la información encontrada se sistematizó en una base de datos en Excel. Con base en la información recabada, y en los objetivos del proyecto, se procedió a evaluar el estado de salud de acuerdo con las regiones previamente establecidas por la consultoría "1.1.1

Estudio de factibilidad climática para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas, comunidades y medio de vida en la Península de Yucatán”. Para el caso de Quintana Roo, se plantea seguir la regionalización definida previamente por Healthy Reefs Initiative (McField et al., 2022), y se consideraron las regiones usadas en el análisis de arrecifes (Tabla 3).

Las regiones del proyecto ACCIÓN delimitadas en la consultoría 1.1 con base en criterios terrestres no son útiles para el análisis de arrecifes. Por ello, se definieron más regiones (véase la Tabla 2). Para el estado de Campeche, las regiones que abarca el análisis son A, B y C y en este análisis se denomina “la región del Banco de Campeche”; las regiones del estado de Yucatán son D, E y F y corresponden al Banco de Campeche en Yucatán, y las regiones que corresponden al estado de Quintana Roo son G, H e I y corresponden al Norte Quintana Roo, Cozumel, Centro Quintana Roo (Sian Ka’an), Sur Quintana Roo y en la región de otras islas tenemos a la región de Banco Chinchorro.

TABLA 3. REGIONES CORRESPONDIENTES AL PROYECTO ACCIÓN EN LOS ESTADOS DE CAMPECHE, YUCATÁN Y QUINTANA ROO Y LAS REGIONES USADAS EN ANÁLISIS DE ARRECIFES

Estado	Región del proyecto ACCIÓN	Región usada en análisis de arrecifes
Campeche	A	Banco de Campeche
Campeche	B	Banco de Campeche
Campeche	C	Banco de Campeche
Yucatán	D	Banco de Campeche en Yucatán
Yucatán	E	Banco de Campeche en Yucatán
Yucatán	F	Banco de Campeche en Yucatán
Quintana Roo	G	Norte de Quintana Roo y Cozumel
Quintana Roo	H	Centro Quintana Roo
Quintana Roo	I	Sur Quintana Roo

Se colectó información de 205 sitios; 156 de estos sitios se localizan en el Caribe mexicano y 49 en el Banco de Campeche (Fig. 5; Tabla 4). Los arrecifes del Banco de

Campeche se encuentran en una región conocida por tener arrecifes de tipo plataforma, que se extienden hacia el Golfo, a una distancia considerable de la costa, entre 80 y 130 kilómetros. Estos arrecifes presentan una buena condición de salud por estar alejados de los asentamientos humanos, y pese a estar sujetos a una pesca intensiva (Tunnell 1992). Los arrecifes de esta zona están conformados por: Cayo Arenas, Bajo Nuevo, Bancos Ingleses, Triángulos Oeste, Triángulos Este, Triángulos Sur, Banco Pera, Bajos Obispos, Banco Nuevo y Cayo Arcas, mientras que en Yucatán se encuentra el arrecife Alacranes (Jordán–Dahlgren 2004).

Los arrecifes del Banco de Campeche se caracterizan por estar formados por especies de coral constructores de arrecife, así como presentar una mayor cobertura de coral que los arrecifes del Caribe mexicano en Quintana Roo (Fig. 6) (Pérez-Cervantes et al, 2017). En cambio, los arrecifes de Quintana Roo forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual abarca aproximadamente 1,000 km desde México hasta Honduras. Las regiones en las que HRI divide la región costera son: Norte Quintana Roo, Centro Quintana Roo, Sur Quintana Roo y en la región insular: Banco Chinchorro y Cozumel (McField et al., 2022).

TABLA 4. INFORMACIÓN DE COLECTA DE 205 SITIOS EN LOS ESTADOS DE YUCATÁN, CAMPECHE Y QUINTANA ROO

Tipo de información	Estado	Región proyecto ACCIÓN	Región usada en análisis de arrecifes	Años de monitoreo	# de sitio	Método	Referencia
Reporte técnico	Campeche	A, B, C	Banco de Campeche	2004	12	Transecto en línea	(Hernández-Torralba et al., 2005)
Artículo	Yucatán	D, E, F	Banco de Campeche en Yucatán	2012	7	Cuadrante	(Ortegón-Aznar et al., 2012)
Artículo	Campeche	A, B, C	Banco de Campeche	2016	5	Foto Cuadrante	(Perera et al., 2017)
Base de datos	Yucatán y Campeche	A, B, C, D, E, F	Banco de Campeche en Yucatán y Banco de Campeche	2016	10	AGRRA	BARCOLAB, (Pérez-Cervantes et al., 2017)
Artículo	Yucatán	D, E, F	Banco de Campeche en Yucatán	2019	15	Punto intercepto	(Favoretto et al., 2020)

Tipo de información	Estado	Región proyecto ACCIÓN	Región usada en análisis de arrecifes	Años de monitoreo	# de sitio	Método	Referencia
Base de datos	Quintana Roo	G, H, I	Banco Chinchorro, Centro Quintana Roo (Sian Ka'an), Cozumel, Norte Quintana Roo y Sur Quintana Roo	2005 a 2022	156	AGRRA	HRI

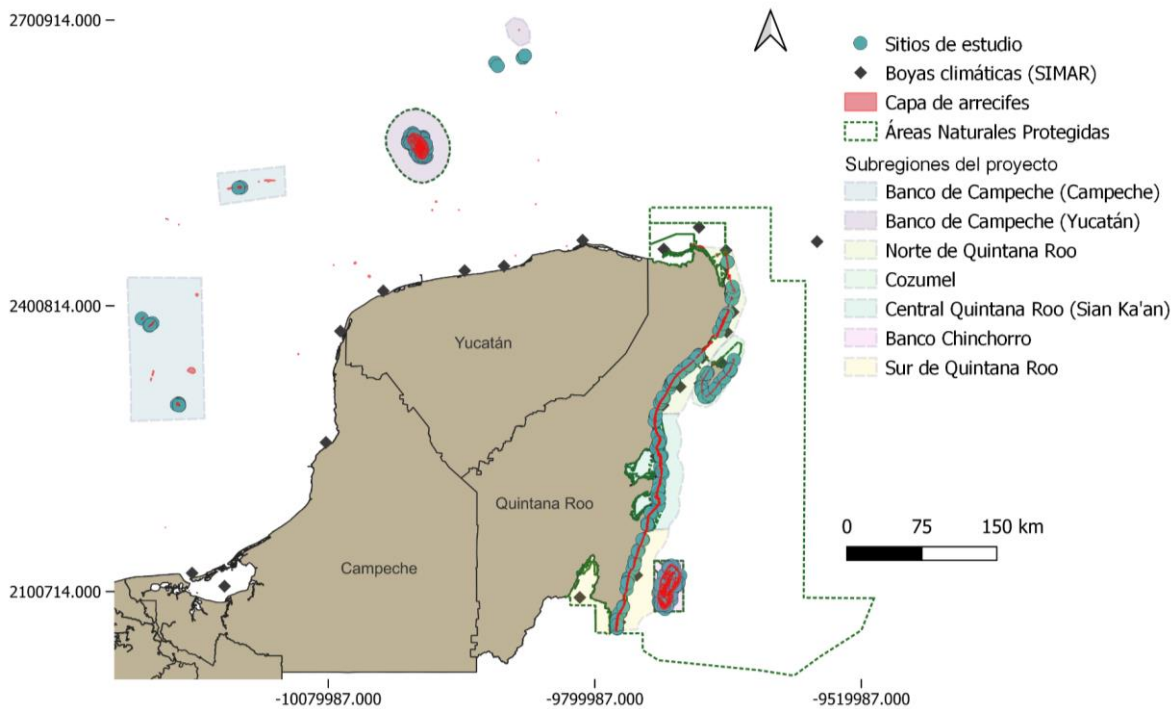


FIGURA 5. ÁREA DE ESTUDIO CON ECOSISTEMAS CORALINOS

Los arrecifes coralinos de la península de Yucatán, México, abarcan una extensión significativa y diversa de hábitats marinos. Basados en datos precisos provenientes del "Millennium Coral Reef Mapping Project" y la capa de hábitats bentónicos de la CONABIO (Tabla 5), se puede apreciar la variabilidad en la extensión de los arrecifes en

diferentes subregiones. Por ejemplo, el Banco Campeche exhibe un área extensa, seguido de cerca por el Banco Chinchorro. Las subregiones como el Centro Quintana Roo, que incluye Sian Ka'an, y Cozumel, también cuentan con áreas significativas de arrecifes.

No obstante, es esencial considerar el potencial sesgo en las zonas insulares debido a las limitaciones de resolución espacial y precisión en el cálculo basado en el "Millennium Coral Reef Mapping Project". En el caso de los arrecifes insulares, este sesgo podría llevar a una sobrestimación de la extensión real de los arrecifes, ya que la técnica de modelado utilizada en el proyecto podría identificar erróneamente áreas terrestres o poco profundas como parte de los arrecifes. A pesar de este posible sesgo, queda claro que los arrecifes coralinos en la península de Yucatán son un recurso invaluable que merece una atención constante para su conservación y manejo sostenible.

TABLA 5. EXTENSIÓN DEL ARRECIFE EN LAS DIFERENTES REGIONES DE ESTUDIO DE ARRECIFES

REGIÓN DE ESTUDIO DE ARRECIFES	EXTENSIÓN DEL ARRECIFE EN HECTÁREAS
Banco Campeche	7,822
Banco Campeche en Yucatán	24,900
Banco Chinchorro	16,200
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	7,100
Cozumel	2,600
Norte Quintana Roo	4,200
Sur Quintana Roo	3,100

Fuente: "Millennium Coral Reef Mapping Project" y la capa de hábitats bentónicos de CONABIO.

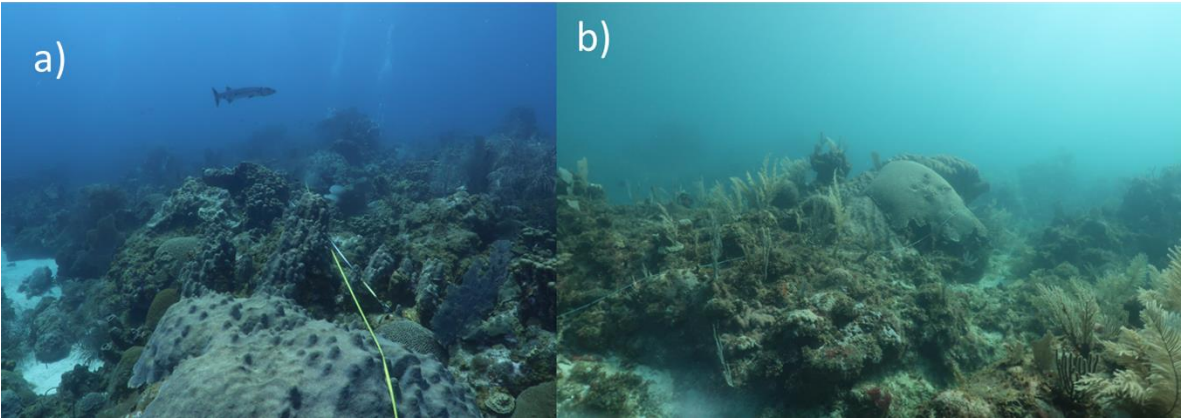


FIGURA 6. ARRECIFES DE LA Península DE YUCATÁN

Notas: a) Banco de Campeche (Cayo Arenas) y b) Norte de Quintana Roo (Puerto Morelos).

Los datos colectados se dividieron en las regiones que corresponden a Banco de Campeche, Banco de Campeche en Yucatán, Norte Quintana Roo, Centro Quintana Roo (Sian Ka'an), Cozumel, Banco Chinchorro y Sur Quintana Roo. Los datos abarcan del año 2004 al 2022; la tabla 6 muestra por región los años que tienen información marcados en distinto color. No todos los sitios cuentan con datos para todos los años. Por lo cual, para poder generar series de tiempo, se eligieron aquellos sitios que tuvieran dos o más muestreos entre 2004 y 2022. Así se obtuvieron 48 series de tiempo para el Caribe mexicano (Tabla 6).

TABLA 6. REGIONES Y AÑOS EN LOS QUE SE ENCONTRÓ INFORMACIÓN, ASÍ COMO NÚMERO DE SITIOS POR REGIÓN, NÚMERO DE SITIOS CON SERIES DE TIEMPO

Región usada en análisis de arrecifes	2004	2005	2006	2009	2011	2012	2014	2016	2018	2019	2021	2022	Número de sitios	Número de sitios con series de tiempo
Banco de Campeche													19	0
Banco de Campeche en Yucatán													30	0

Región usada en análisis de arrecifes	2004	2005	2006	2009	2011	2012	2014	2016	2018	2019	2021	2022	Número de sitios	Número de sitios con series de tiempo
Banco Chinchorro													37	8
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)													32	4
Cozumel													20	10
Norte Quintana Roo													45	15

Nota: Los colores muestran el año en los que hay datos en la región.

IV.1.2. Enfermedades coralinas

Los corales escleractinios pueden estar sujetos a presentar distintas enfermedades que afectan y ocasionan la pérdida de tejido (Weil, 2004). Lo que las caracteriza es el color que van dejando estas lesiones, por lo cual las enfermedades han sido nombradas con base en esto como "Enfermedad de la banda amarilla", "Plaga blanca", "banda negra", entre otras (Harvell et al., 2007; Raymundo et al., 2008). En los últimos años la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus siglas en inglés) ha afectado gravemente a los corales en varias regiones del Caribe (Kramer et al., 2019), incluida la parte que le toca a la Península de Yucatán. Por esto motivo y debido al impacto que ha tenido en los arrecifes en los últimos años, los análisis efectuados en este estudio se enfocan solamente en esta enfermedad.

IV.1.3. Índice de salud arrecifal

El poder evaluar la salud arrecifal requiere considerar distintos indicadores como la cobertura de corales escleractinios, macroalgas, biomasa de peces herbívoros y biomasa de peces de importancia comercial (Fig. 7). Para esto HRI desarrolló un índice que combina distintos indicadores de coral e indicadores de biota arrecifal, a los cuales

se les asigna una calificación. Las calificaciones se calculan convirtiendo el valor promedio de los datos de cada indicador en condiciones clasificadas del uno (crítico) al cinco (muy bueno), según los datos proporcionados en la tabla 7. Luego se promediaron las puntuaciones clasificadas para cada indicador.

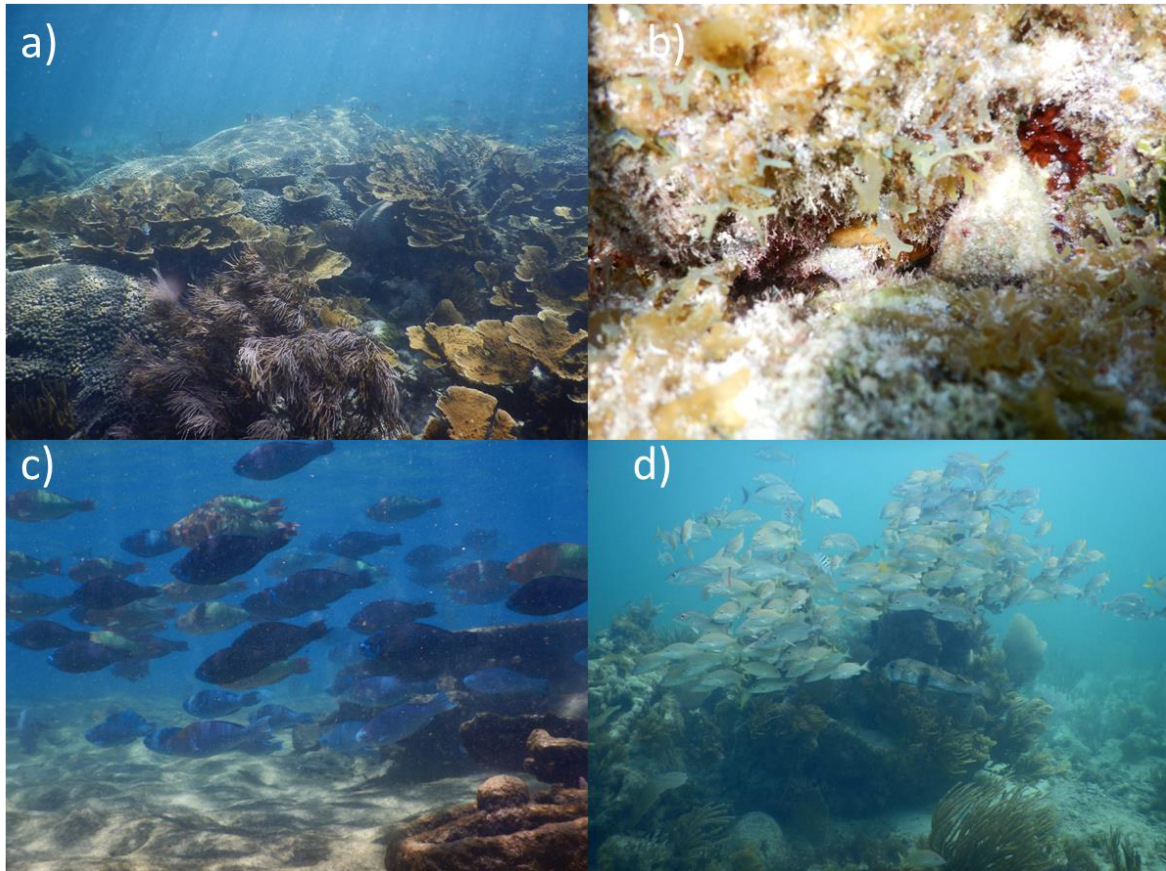


FIGURA 7. INDICADORES DE SALUD ARRECIFAL CORAL, MACROALGAS, PECES, PECES HERBÍVOROS Y PECES COMERCIALES

Nota: a) corales en Puerto Morelos, b) macroalga del género *Dictyota* en norte de Quintana Roo, c) peces herbívoros en el Arrecife Alacranes, d) peces comerciales en Puerto Morelos. Fotos BARCOLAB.

TABLA 7. VALORES DE LOS INDICADORES DEL ÍNDICE DE SALUD ARRECIFAL TOMADA DE REPORTE DE LA SALUD ECOLÓGICA DEL ARRECIFE MESOAMERICANO 2022

VALORES DE LOS INDICADORES DE ÍNDICE DE SALUD ARRECIFAL				
Rango	Cobertura de coral	Cobertura de macroalgas carnosas	Biomasa de peces herbívoros	Biomasa de peces comerciales
Muy bien	40%	1%	3290	1620
Bien	20%	5%	2740	1210
Regular	10%	12%	1860	800
Mal	5%	25%	990	390
Crítico	<5%	>25%	<990	<390

IV.1.4. Índices ecológicos

Se utilizaron índices de diversidad coralina para evaluar los arrecifes de la Península de Yucatán, contemplando la disponibilidad de información en todos los sitios considerados. Tres indicadores fundamentales de diversidad fueron utilizados en este proceso: riqueza, Número 1 de Hill y Número 2 de Hill (Jost, 2006). El índice de riqueza coralina se basa en la cantidad total de especies de corales presentes en cada sitio de muestreo. Representa la variabilidad y abundancia de especies únicas en un área específica. Por otro lado, el Número 1 de Hill, también conocido como diversidad efectiva de especies, tiene en cuenta tanto la abundancia relativa como la equidad entre las especies. Este indicador pondera la presencia de especies dominantes y raras en la comunidad coralina, ofreciendo una visión más equilibrada de la diversidad. El Número 2 de Hill, por su parte, pone mayor énfasis en las especies dominantes, otorgándoles un peso adicional en la evaluación de la diversidad. Este indicador resalta la importancia de las especies más abundantes en la comunidad coralina, lo que puede ser especialmente relevante para comprender las dinámicas de las poblaciones dominantes. En resumen, mientras que el índice de riqueza se enfoca en la cantidad total de especies, el Número 1 y el Número 2 de Hill incorporan factores de abundancia y equidad, así como el peso de las especies dominantes, proporcionando una comprensión más completa y matizada de la diversidad coralina en la Península de Yucatán. Además de estos índices se utilizó el Índice de Función Arrecifal (IFA), ya que

este nos ayuda a la funcionalidad de los arrecifes. Dicha funcionalidad está dada por la cobertura, la capacidad de acumular carbonato de calcio y la complejidad morfológica (González-Barrios y Álvarez-Filip et al., 2018). Este índice puede evaluar el impacto funcional de los cambios en la composición de la comunidad coralina, como la pérdida de ciertas especies después de algún evento de enfermedad, pero también sirve para estimar las trayectorias de funcionamiento que los arrecifes pueden tener en respuesta a factores estresantes como el cambio climático (González-Barrios y Álvarez-Filip et al., 2018).

IV.1.4.1. Análisis estadísticos realizados a los indicadores ecológicos

Se realizaron diversas pruebas estadísticas con el objetivo de evaluar las diferencias significativas en los valores ecológicos actuales de las varias variables utilizadas en este estudio para la Península de Yucatán; para la región de Quintana Roo también se evaluó la diferencia entre distintos años. Estas pruebas permitieron evaluar las variaciones en las características ecológicas tanto entre diferentes variables como a lo largo del tiempo.

IV.1.4.1.1. Prueba de Kruskal-Wallis

Esta prueba se utilizó para evaluar las diferencias en los valores ecológicos actuales en diferentes variables ecológica. Esta prueba no paramétrica es una extensión del análisis de varianza (ANOVA) y se utiliza cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad o cuando las muestras son pequeñas. El estadístico Kruskal-Wallis se basa en los rangos de las observaciones y determina si existe una diferencia significativa en las medianas de las muestras.

En nuestro estudio, el estadístico Kruskal-Wallis se calculó para cada variable ecológica, comparando los valores entre diferentes subregiones geográficas o años. El valor p asociado al estadístico Kruskal-Wallis nos proporciona información sobre si existe una diferencia significativa en las medianas de las muestras. Si el valor p es menor que el nivel de significancia (generalmente establecido en 0.05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay al menos una mediana que es significativamente diferente.

IV.1.4.1.2. Análisis Post Hoc

Tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis y encontrar diferencias significativas en las medianas, se realizó un análisis post hoc para identificar cuáles grupos específicos presentan esas diferencias. En este estudio, se utilizó el ajuste de Benjamini-Hochberg para controlar el riesgo de falsos positivos debido a la realización múltiple de pruebas.

El análisis post hoc utilizado fue la prueba de Dunn, la cual compara todos los posibles pares de grupos para determinar cuáles tienen diferencias significativas en sus medianas.

La prueba de Dunn ajustado de Benjamini-Hochberg compara los grupos utilizando los rangos promedio y calcula los valores p corregidos. Si el valor p corregido es menor que un nivel de significancia predefinido (generalmente 0.05), se concluye que hay una diferencia significativa entre los grupos comparados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, debido a la corrección de múltiples pruebas, se vuelve más estricto en la interpretación de la significancia para mitigar los errores tipo I, los cuales son aquellos resultados que son falsos positivos.

IV.1.5. Indicadores climáticos

IV.1.5.1. Estrés térmico

Para indicar la intensidad de los eventos de blanqueamiento que pueden haber experimentado las colonias de coral, utilizamos las "Semanas de calentamiento en grados" (DHW). Esta métrica ha sido ampliamente utilizada para la evaluación de eventos de estrés térmico en sistemas de arrecifes (Eakin et al., 2010; Hughes et al., 2018). Las DHW son una medida del estrés térmico acumulado experimentado por los corales, que se calcula sumando los HotSpots de 1 °C o más del periodo anterior de 12 semanas; las DHW se han correlacionado directamente con la ocurrencia y la severidad del blanqueamiento (Liu et al., 2014; Tabla 8). Los valores de DHW se obtuvieron del producto Coral Reef Watch (CRW, V 3.1) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Este producto consta de rásteres con información satelital de 5 km desde 1986¹. Estos datos acumulan grandes periodos de estrés térmico, y se ha demostrado que son un predictor más efectivo del blanqueamiento masivo de corales (Glynn y D'Croz, 1990). Este parámetro es la medida acumulativa de la intensidad del estrés térmico (HotSpots); mide la magnitud del estrés térmico diario que puede provocar el blanqueamiento del coral y la duración integrada durante el periodo de 12 semanas más reciente (es decir, los 84 días más recientes). Se expresa en la unidad °C-semana (Liu et al., 2014).

El estrés por calor en los arrecifes de coral se caracterizó mediante el análisis de los píxeles ubicados dentro de una distancia de 20 km de las ubicaciones de los arrecifes en el área de la Península de Yucatán. Las ubicaciones de los arrecifes se obtuvieron a partir de la capa de arrecifes coralinos de la CONABIO y del Millenium Coral Reef

¹ https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_composite.php

Mapping Project descritas en el primer producto de esta consultoría. El indicador principal utilizado para evaluar la exposición al estrés térmico fue el DHW máximo anual, que representa el máximo estrés térmico ocurrido en el año. Se calcularon cinco métricas principales para cada píxel: a) el valor máximo de DHW por píxel para toda la serie temporal, b) la frecuencia de valores máximos de DHW anuales ≥ 4 °C-semanas (un indicador del "riesgo de blanqueamiento" del coral) por píxel, c) la frecuencia de valores máximos de DHW anuales ≥ 8 °C-semanas (Fig. 8) (un indicador del "riesgo de mortalidad" inducido por el blanqueamiento) por píxel y el año en el que ocurrió el DHW máximo (Muñiz-Castillo et al., 2019).

Además de la exposición al estrés por calor, es crucial considerar la frecuencia de eventos de riesgo de blanqueamiento, los cuales indican la probabilidad de que se produzcan condiciones propicias para el blanqueamiento de los corales. En este sentido, se han identificado sitios donde se ha registrado al menos un evento anual con valores superiores a 4 °C-semanas, lo que indica un mayor riesgo de eventos de blanqueamiento. Además de la exposición al estrés por calor y los eventos de riesgo de blanqueamiento, es fundamental considerar los eventos de riesgo de mortalidad de los corales. Estos eventos se definen como aquellos sitios con una exposición mayor a 8 °C-semanas, lo que indica condiciones extremadamente peligrosas que pueden resultar en la muerte de los corales.

TABLA 8. NIVEL DE INTENSIDAD DEL EVENTO DE BLANQUEAMIENTO

Intensidad de blanqueamiento	Definición
BAJO	menor a 4 DHW
MEDIO	4-8 DHW
ALTO	Mayor a 8 DHW

Fuente: Liu et al., 2014

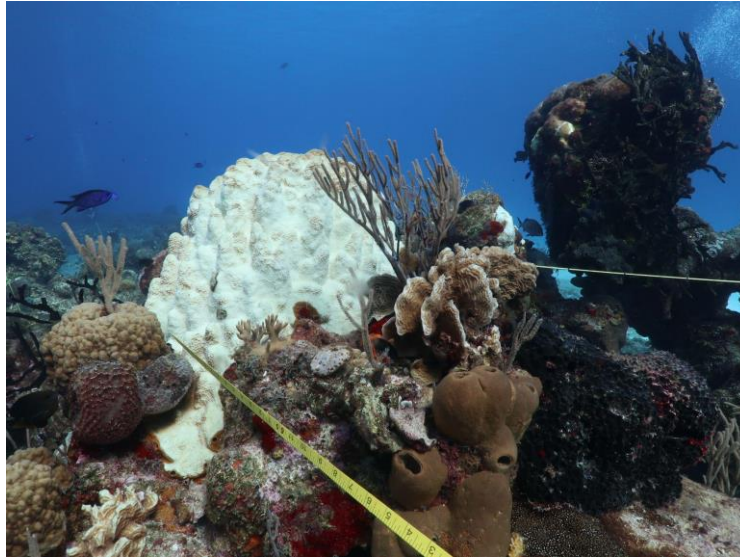


FIGURA 8. COLONIA DE CORAL CON BLANQUEAMIENTO

Nota: Coral *Orbicella faveolata* en Cozumel en 2019 con 7 DHW.

IV.1.5.2. Ciclones

En el caso de los ciclones, la métrica utilizada para medir y clasificar la intensidad del evento fue la categoría del ciclón, ya que ha sido relacionado con el nivel de severidad de daño que puede ocasionar en los arrecifes. Esta clasificación sigue la información de la Escala de Huracanes Saffir-Simpson basada en la velocidad del viento proporcionada por la agencia estadounidense (Tabla 9; Knapp et al., 2010, 2018). Para los análisis se decidió juntar las categorías de depresión y tormenta tropical en “tormentas”, mientras que las categorías 4 y 5 se agrupó como huracanes mayores (González-Barrios et al., 2023). La información se obtuvo del International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) v. 04 de la NOAA; los datos de tormentas vienen en formato CSV y shapefiles. El IBTrACS tiene una resolución espacial de ~10km, una resolución temporal interpolada a 3 horas y una cobertura de 70° Norte a 70° Sur y 180° Oeste a 180° Este. La información está disponible desde 1980, consta de un archivo shapefile y un base de datos de Excel (<https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php?name=ib-v4-access>, Knapp et al., 2010, 2018). El IBTrACS tiene la información de la tormenta en una captura cada tres horas, lo que proporciona una idea de la intensidad a lo largo de la trayectoria del huracán. Se utilizó un sistema de información geográfica para crear una zona de influencia de 30 km de radio, el cual después se interceptó con el shapefile de los 205 sitios, de modo que se pudieron identificar todos los ciclones que pasaron dentro de un radio de 30 km.

TABLA 9. NIVEL DE INTENSIDAD DE LOS HURACANES BASADO EN LA ESCALA DE VIENTO SAFFIR-SIMPSON

Categoría	Rango de la velocidad máxima del viento de la tormenta (nudos)	Tasa de cambio de cobertura de coral (%±desviación estándar)
Depresión tropical	< 34	-6 ± 22%
Tormenta tropical	34 - < 64	1 ± 25%
H1	65- < 83	-6 ± 20%
H2	84 - < 96	-18 ± 26%
H3	96 - < 113	-20 ± 25%
H4	113 - < 137	-24 ± 30%
H5	> 137	-51±20%

Nota: Los valores de pérdida de cobertura de coral fueron tomados de Álvarez-Filip et al, 2021.

IV.1.5.3. Descripción de colecta y revisión de datos climáticos existentes a nivel estatal

Con la finalidad de identificar los impactos y las amenazas antropogénicas, climáticas y no climáticas históricas y futuras, con series de datos a largo plazo, se colectaron los datos climáticos existentes a nivel estatal. Para ello, se utilizó el Sistema de Información y análisis marino-costero (SIMAR) de la CONABIO (Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021). Dicho sistema cuenta con 25 boyas con información ubicadas en la zona de estudio, las cuales van desde la Laguna de Términos en Campeche, hasta Chetumal (Fig. 5). De este sistema se extrajeron datos de temperatura nocturna superficial del mar de 1981 a 2023, y datos de pH, NO₃ y PO₄ de 1993 a 2023 (Anexo 1). De igual forma se colectaron datos climatológicos de SEMAR, y datos Coral Reef Watch (CRW). Para el caso de los datos de SEMAR estos no contenían series de tiempo de al menos 30 años, por lo cual se decidió utilizar solamente los datos de SIMAR y CRW. El CRW es una rama de la NOAA que se enfoca en monitorear y proporcionar información sobre los arrecifes de coral y su entorno marino. Uno de los productos clave que ofrece CRW es el "5km Sea Surface Temperature (SST) product" o "Producto de Temperatura de la Superficie del Mar a Nivel Global de 5 km". Mientras que el producto que SIMAR ofrece es Temperatura superficial de la mar nocturna diaria con una resolución espacial de 1 km.

IV.1.5.4. Evaluación de la vulnerabilidad y de la relación de causalidad para cada factor de vulnerabilidad o amenaza identificado en los ecosistemas de arrecife de coral

Para evaluar la vulnerabilidad de los sitios a cada factor de amenaza identificado se utilizaron tasa de cambio de cobertura de coral. Esta fórmula nos permite saber si el arrecife perdió o ganó cobertura de coral, valores positivos indica mayor cobertura y valores negativos pérdida, la fórmula es: $\frac{(Vf-Vi)}{t}$ dónde Vf es cobertura final, Vi es la cobertura inicial y t es tiempo, por lo que la tasa en la pérdida o ganancia de cobertura en un año.

IV.2. Estrésos locales y globales

Para establecer cuáles eran los riesgos que afectan a los arrecifes se realizó una búsqueda bibliográfica enfocada en documentos con información sobre los riesgos que han afectado a los arrecifes de coral a nivel mundial. Posteriormente, se realizó una búsqueda sistemática en los buscadores Web of Science, Science Direct y Google Scholar, sobre artículos, reportes, revisiones, capítulos de libro, proyectos y literatura gris cuyo estudio tratará sobre los principales riesgos que afectan la salud de los arrecifes de coral.

IV.2.1. Derrame de hidrocarburos

Se realizó una búsqueda sistemática para recabar información sobre incidentes relacionados con derrame de hidrocarburos que hayan afectado a los arrecifes de la Península de Yucatán. La mayor parte de la información se obtuvo de los informes anuales de PEMEX (PEMEX, 2023a).

IV.2.2. Encallamientos

Se realizó una búsqueda sistemática para recabar información sobre encallamientos en los arrecifes de la Península de Yucatán. De igual forma se contactó directamente con los guardaparques de las Áreas Naturales Protegidas para conocer si ellos tenían registro de estos acontecimientos.

IV.3. Densidad poblacional y demografía

Para el análisis de los patrones de densidad poblacional en la Península de Yucatán, se utilizó información espacial en forma de un archivo ráster con una resolución de 100 metros que se obtuvo del WordIPop², plataforma y proyecto de investigación, que se

² <https://hub.worldpop.org/doi/10.5258/SOTON/WP00660>

dedica a la generación y la difusión de datos sobre la distribución espacial y la composición demográfica de la población mundial. Esta información permitió examinar cómo se distribuye la densidad poblacional humana en la región.

IV.4. Descripción de las principales amenazas percibidas por la población local, y recomendaciones para la implementación de estrategias para su prevención y mitigación

Para el desarrollo de este apartado se realizó el levantamiento de información mediante una encuesta (Tabla 10). Para la aplicación de este cuestionario se utilizó la herramienta electrónica de Google Forms, debido a que tienen una interfaz amigable para el usuario, no se necesita una computadora para responderla y puede ser enviada de forma masiva. El 29 de junio se envió a 95 personas la encuesta por correo electrónico y otros medios de comunicación. Estas personas fueron seleccionadas por su conocimiento en el tema y son representantes del sector académico, y organizaciones de la sociedad civil, así como prestadores de servicios turístico y pescadores que tienen un amplio trabajo en los arrecifes de la Península de Yucatán (Anexo 2). También se aplicaron encuestas de forma presencial a pescadores y prestadores de servicios turístico. Para este caso se utilizaron celulares y tabletas con acceso a internet, y hojas impresas para responder el cuestionario. La encuesta fue respondida por 50 personas. Para poder definir el impacto que las distintas actividades tenían sobre el arrecife se estableció una clasificación en cuatro categorías con su respectivo valor: No aplica (0%), Bajo (25%), Medio (50%), Alto (75%) y Muy Alto (100%). Las principales amenazas percibidas y las recomendaciones se pueden encontrar en la sección: V.4. Descripción de las principales amenazas percibidas por la población local, y recomendaciones para la implementación de estrategias para su prevención y mitigación.

TABLA 10. PREGUNTAS REALIZADAS EN LOS CUESTIONARIOS PARA CONOCER LA PERCEPCIÓN DE LA POBLACIÓN LOCAL SOBRE LAS AMENAZAS

Preguntas
1. ¿Cuál es tu nombre?
2. Correo electrónico:
3. Género
4. ¿Cuál es tu rango de edad?
5. Estado de la República dónde trabajas:
6. ¿En dónde laboras?
7. ¿Qué estado(s) abarca tu área de estudio/trabajo?
8. ¿Sabías qué en tu área de estudio/trabajo hay arrecifes?
9. ¿Has visitado los arrecifes en tu área de estudio/trabajo?
10. ¿Cuántos años de experiencia tienes en el tema de Arrecifes en México?
11. Sabes el estado en el que están los arrecifes en tu área de estudio/trabajo:
12. Por qué medio te enteraste del estado (malo, regular, bueno) de los arrecifes en tu área de estudio/trabajo:
13. De las siguientes actividades, selecciona cuál es el nivel de impacto que tienen en los arrecifes de su área de estudio (Bajo, Medio, Alto, Muy Alto): Extracción de peces de ornato, extracción arena, Pesca comercial, Pesca deportiva, Pesca industrial, Buceo deportivo, Buceo comercial, Buceo industrial, Esnórquel, Deportes acuáticos, Acuicultura, Minería, Construcción de puertos/marinas, Desarrollo inmobiliario costero, Descarga y mal manejo de aguas residuales, Depósito de residuos industriales, Contaminación por hidrocarburos, Sobreexplotación pesquera y Deforestación de la zona costera
14. De las siguientes amenazas, selecciona cuál es el nivel de impacto que tienen en los arrecifes de su área de estudio (Bajo, Medio, Alto, Muy Alto): Huracanes, Aumento de la temperatura (blanqueamiento), Acidificación, Sedimentación, Bloom algales, Eutrofización, Enfermedades, Erosión Depredación, Sargazo, Incremento de nutrientes, y Aumento del nivel del mar
19. Frente a estas amenazas e impactos, ¿cuáles son las alternativas para proteger, restaurar o tener algún tipo de recuperación positiva en los arrecifes coralinos?
20. ¿Qué instituciones u organizaciones conoces que se dedican a proteger y/o restaurar a los arrecifes coralinos en la Península de Yucatán?

IV.4.1. Levantamiento de información de campo

Para completar la información necesaria para establecer los indicadores y los criterios referidos en el Anexo 1 de los términos de referencia de esta consultoría, se contactó a los directores de las siguientes áreas naturales protegidas (ANP): Parque Nacional Arrecife Alacranes, Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an, Reserva de la

Biosfera Sian Ka'an, Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro, Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano, Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, Parque Nacional Isla Contoy, Área de Protección de Flora y Fauna La porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel, Área de Protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté, Reserva de la Biosfera Ría Celestún, Reserva de la Biosfera Ría Lagartos, Reserva de la Biosfera Tiburón Ballena, Parque Nacional Tulum, Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil, Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam, Reserva de la Biosfera Los Petenes y Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos.

La información solicitada fue la siguiente: número de visitantes, número de operadores, número de permisos de restauración, número de brigadistas, número de pescadores autorizados, número de embarcaciones y frecuencia de derrames de hidrocarburos. La solicitud fue enviada a las personas responsables de las distintas ANP, de igual forma el 27 de junio se realizó una solicitud a la CONANP por medio del INAI para saber el número de operadores de servicios turísticos, número de pescadores autorizados y número de permisos para realizar actividades de restauración en 18 ANPS.

IV.5. Identificación de objetivos y metas de conservación y restauración

Se realizó una búsqueda bibliográfica sistemática donde se identificaron distintos proyectos que han realizado restauración de arrecifes de coral en cada uno de los estados.

V. Resultados

V.1. Parámetros ecológicos

Se tiene información para 205 sitios en las diferentes regiones. En el Anexo 3 se incluye el total de sitios monitoreados considerando todas las temporadas para cada sitio, así como la región a la que pertenecen y la disponibilidad de series de tiempo históricas (2 o más monitoreos). Para el Caribe se eligieron los datos más recientes para conocer la condición actual de los ecosistemas arrecifales y para el Banco de Campeche los datos para los que se tiene acceso. Para las regiones del Caribe se utilizaron datos de 2021 y para la región de Banco de Campeche, de 2016.

De manera de resumen el Banco de Campeche se caracteriza por tener una cobertura de coral (32%), superior a los valores observados en el Caribe Mexicano. Mientras que, para el Caribe mexicano, la zona de Banco Chinchorro presentó una mayor cobertura de macroalgas carnosas y Cozumel las más altas biomásas tanto de peces herbívoros como comerciales (Fig. 9).

Con relación a las macroalgas, se observó que, en general, en todas las regiones de la Península de Yucatán hay valores elevados de cobertura, lo cual indica condiciones de malas a críticas. Este hallazgo indica que los arrecifes de la Península de Yucatán están experimentando impactos significativos debido a la entrada de nutrientes. Se concluye de los resultados la necesidad de tomar medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua en la región, a través de prácticas sostenibles en la agricultura, el tratamiento adecuado de las aguas residuales y la implementación de estrategias de manejo costero.

En contraste con la preocupante situación de las macroalgas, la condición actual de los corales en los arrecifes de la Península de Yucatán varía de pobre a aceptable. Se ha observado que los arrecifes en Yucatán y el Banco de Campeche presentan una condición buena en términos de cobertura de coral vivo. Hay que resaltar que en el Caribe Mexicano prácticamente todas las regiones cuentan con una condición mala a crítica en relación con la cobertura de coral. Aunque la cobertura de coral vivo puede variar entre los sitios monitoreados, se han identificado regiones donde los corales tiene una salud calificada como muy bien, como es el caso de Banco Chinchorro y el Sur de Quintana Roo. A pesar de los desafíos y las presiones a los que se enfrentan los arrecifes, algunos sitios todavía mantienen una condición buena en cuanto a corales.

En cuanto a los peces herbívoros, los resultados revelan una variación significativa entre las diferentes regiones de la Península de Yucatán. Se observó que Cozumel es la única región con valores calificados como muy bien en el índice de salud arrecifal en términos de biomasa de peces herbívoros, lo que indica una condición saludable en ese sitio en particular. Por otro lado, la mayoría de las demás regiones presentaron una condición mal o crítica en relación con la biomasa de peces herbívoros. Esto implica que la abundancia de estos peces, que desempeñan un papel crucial en el control de las algas y la promoción del crecimiento de los corales, es preocupantemente baja en la mayoría de los arrecifes estudiados. La situación actual de una condición mal o crítica de los peces herbívoros en la mayoría de las regiones resalta la necesidad de implementar medidas de conservación y manejo pesquero adecuadas. Es crucial establecer áreas protegidas, promover prácticas pesqueras sostenibles y fomentar la educación y conciencia sobre la importancia de estos peces para la salud de los arrecifes.

Con respecto a la relación de los peces comerciales, se observa una situación más optimista en todas las regiones de la Península de Yucatán. Los valores están calificados como muy bien por el índice de salud arrecifal en la mayoría de las áreas estudiadas. Es importante destacar que en este caso se consideran todas las familias de peces comerciales, lo que genera valores más positivos en comparación con los reportados anteriormente por Healthy Reefs en los que solo consideraban a los meros y pargos.

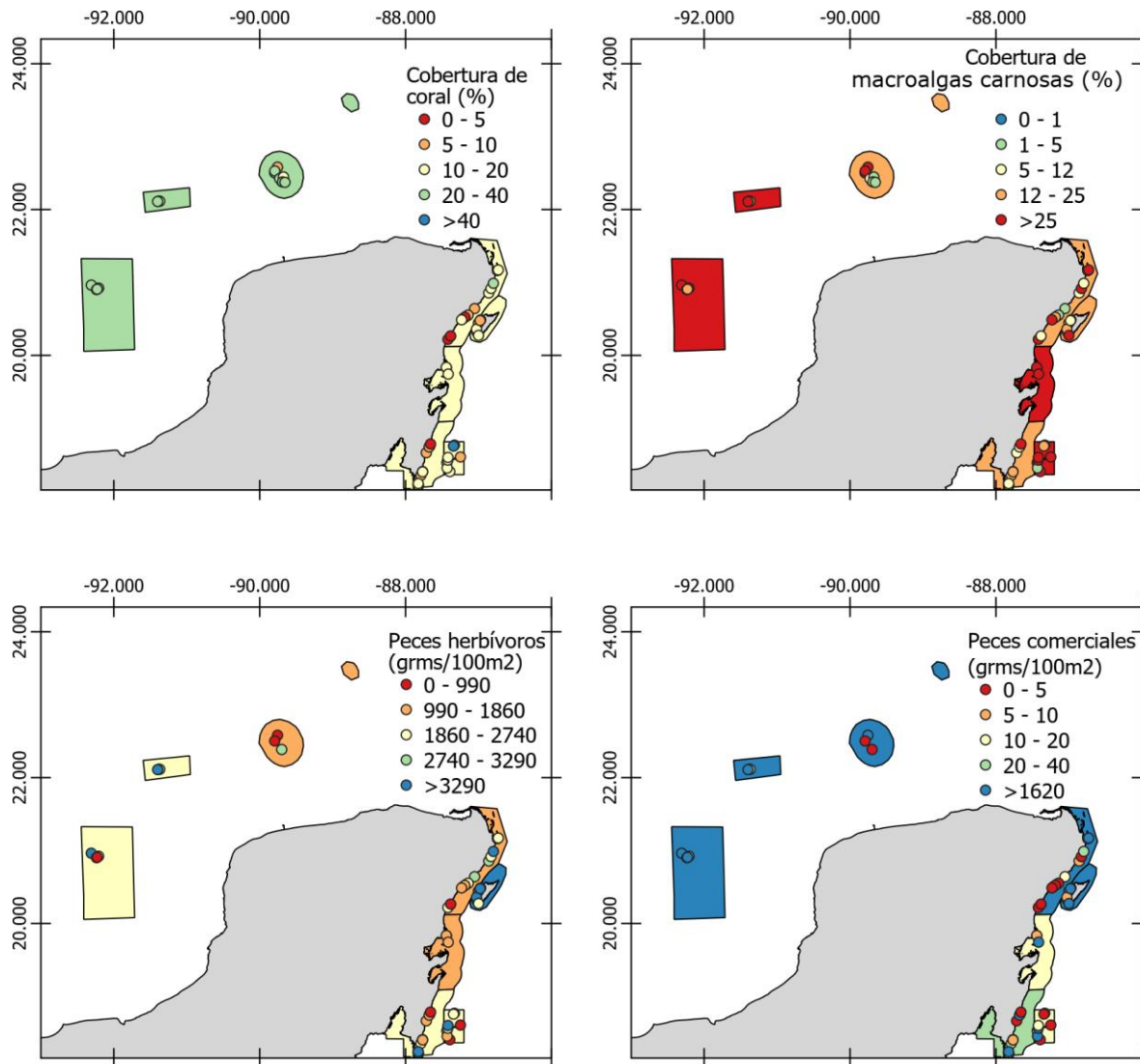


FIGURA 9. MAPA DE LA COBERTURA PROMEDIO DE CORAL, MACROALGAS, BIOMASA DE PECES HERBÍVOROS Y COMERCIALES

Nota: Los colores que están tanto a nivel de sitio como de región representan el índice de salud de HRI de la Tabla 7.

De los 205 sitios colectados, se filtraron sólo aquellos con series de tiempo de más de dos años de monitoreo; en total 48 sitios en diferentes regiones del Caribe cumplieron con estas características (Anexo 3). A continuación, se describen los indicadores de salud de cada región, de cobertura de coral, macroalgas, y biomasa de peces herbívoros y comerciales.

V.1.1. Cobertura de coral

La cobertura de coral vivo es un indicador utilizado para estimar el estado de salud de los arrecifes de coral. Se expresa como el porcentaje resultante de dividir el coral vivo

entre todos los organismos o los sustratos analizados. Los valores de cobertura de coral que se califican como bien en el índice de salud arrecifal mayores a 20%. A lo largo del tiempo, la cobertura de coral cambia y para este estudio se utilizaron datos de 2005 a 2022.

En regiones como el Norte de Quintana Roo, Centro de Quintana Roo y Banco Chinchorro, se observa un aumento de cobertura de coral antes de 2018 y una disminución después de ese año (Fig. 10). Esta disminución posiblemente pueda atribuirse a la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus siglas en inglés). La región del Caribe Mexicano ha experimentado impactos significativos en la cobertura de coral debido al SCTLD. Esta enfermedad comenzó a afectar a los arrecifes de la región en 2018, y ha tenido consecuencias ecológicas devastadoras en el área. El SCTLD se caracteriza por la muerte rápida del tejido coralino, lo que resulta en una disminución drástica de la cobertura de coral y la pérdida de estructura tridimensional en los arrecifes (Álvarez-Filip et al., 2019; Estrada-Saldívar et al., 2020; Precht et al., 2016). Desde su aparición, la enfermedad ha afectado a una amplia gama de especies de corales en la región del Caribe Mexicano, por lo que sus impactos ecológicos son preocupantes; además de la disminución en la cobertura de coral, se han observado cambios en la composición de especies y en la estructura del ecosistema (Álvarez-Filip et al., 2019, 2022; Estrada-Saldívar et al., 2020, 2021).

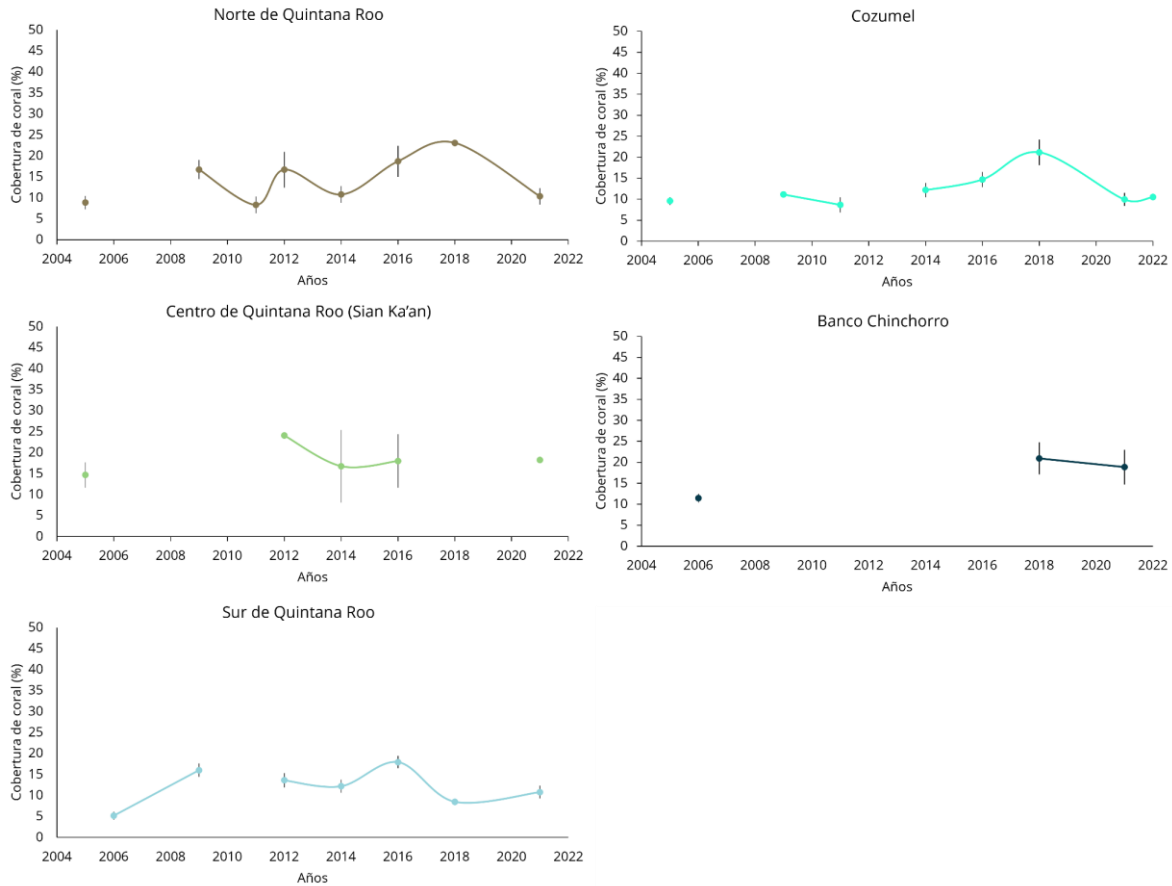


FIGURA 10. COBERTURA PROMEDIO DE CORAL AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

V.1.2. Cobertura de macroalgas carnosas

Las macroalgas carnosas son organismos esenciales en los ecosistemas marinos. Sin embargo, su aumento de cobertura está asociado con la disminución de la cobertura de coral (Kramer 2003; Cote et al. 2005). Este aumento persistente de las macroalgas carnosas se debe a la contaminación por nutrientes y a una disminución en la herbivoría, lo cual representa una amenaza para el crecimiento de los corales y el reclutamiento de nuevas colonias de coral, ya que no permite el asentamiento de larvas en los arrecifes.

La contaminación por nutrientes provenientes de actividades humanas como la agricultura, la urbanización y el turismo costero estimula el crecimiento de las macroalgas. Estas algas se benefician de los altos niveles de nutrientes y pueden competir con los corales por espacio y luz solar, con lo que afectan su capacidad de crecimiento y reproducción.

Además, la disminución en la herbivoría, es decir, la falta de consumo de algas por parte de organismos como los peces herbívoros y los erizos de mar contribuye al crecimiento descontrolado de las macroalgas. La sobrepesca y la degradación de los hábitats de estos herbívoros pueden reducir su población, lo que permite un crecimiento sin control de las algas. En las series de tiempo de las diferentes regiones arrecifales se observa un aumento en la cobertura de macroalgas y sólo en 2006, en Banco Chinchorro, había una cobertura menor a 5%, lo que indicaba una calificación como bien en el índice de salud arrecifal (Fig. 11).

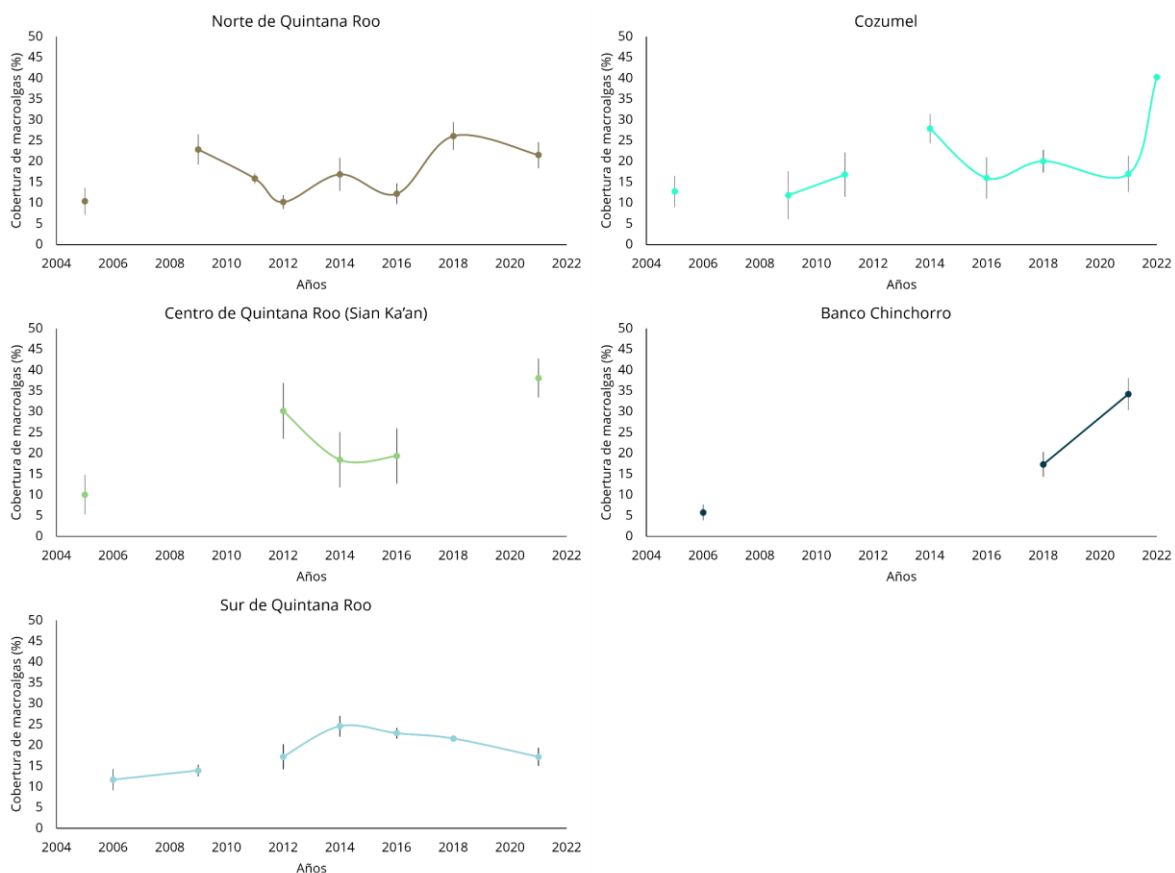


FIGURA 11. COBERTURA PROMEDIO DE MACROALGAS AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

V.1.3. *Biomasa de peces herbívoros*

La biomasa de peces herbívoros, como el pez loro, es un indicador crucial de la cantidad de estas especies esenciales para los arrecifes. Estos peces desempeñan un papel

fundamental al alimentarse de las macroalgas, lo cual promueve un mayor crecimiento de los corales en el arrecife. Un valor de biomasa mayor a 3,200 gr/100m² indica una calificación de muy bien en el índice de salud arrecifal (tabla 7). Antes de 2018, la mayoría de las regiones del Caribe Mexicano mostraban una tendencia al aumento de los peces herbívoros. Sin embargo, a partir de 2018, se observó una disminución en estas poblaciones, excepto en Cozumel, donde se registró un ligero aumento (Fig. 12). Esta disminución en la biomasa de peces herbívoros es preocupante, ya que estos peces desempeñan un papel crucial en el control de las macroalgas y en el fomento del crecimiento coralino. La presencia de una biomasa alta de peces herbívoros indica un buen estado de salud en el arrecife, ya que ayuda a mantener el equilibrio entre las algas y los corales.

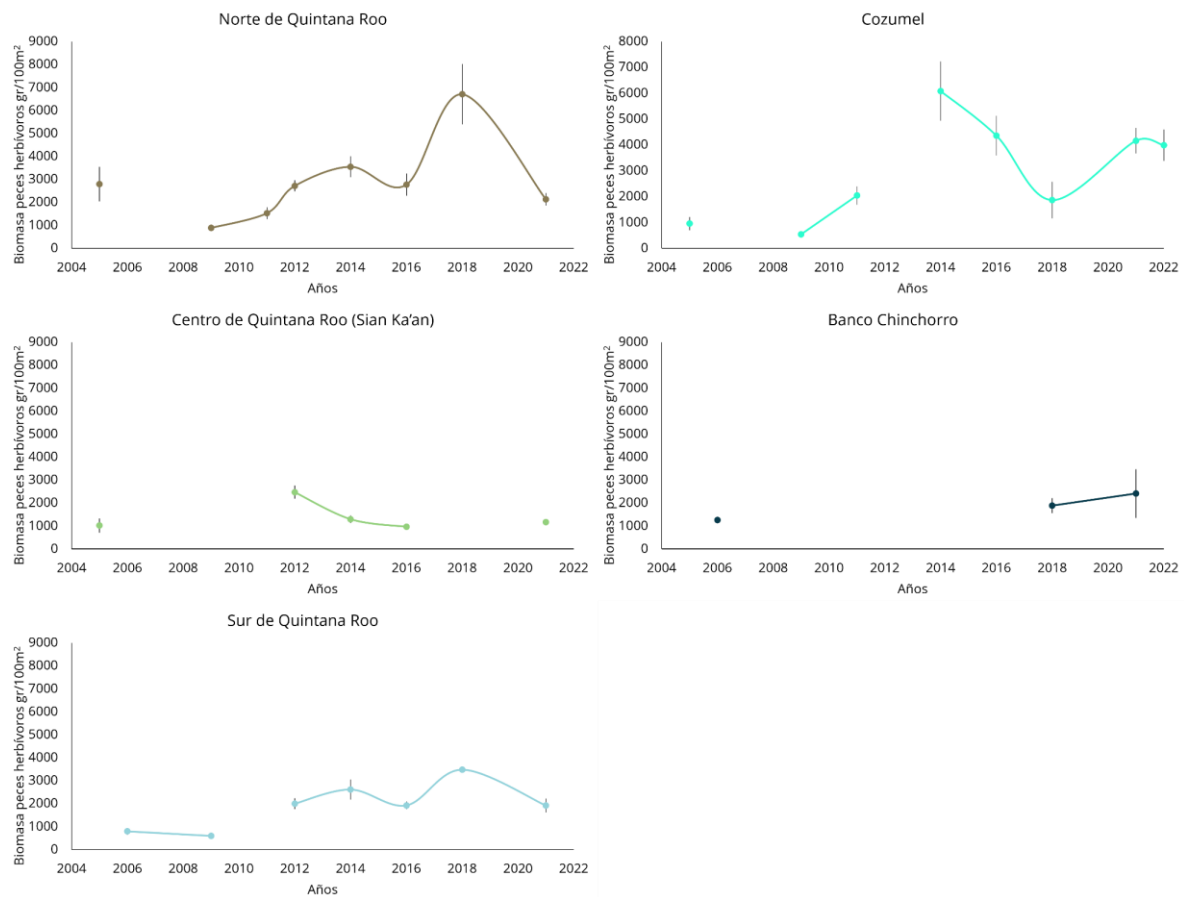


FIGURA 12. BIOMASA PROMEDIO DE PECES HERBÍVOROS AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

V.1.4. Biomasa de peces comerciales

La biomasa de peces comerciales indica la cantidad de peces de importancia pesquera que se encuentran en el arrecife. Lamentablemente la mayoría de los sitios tienen biomazas por debajo de 1,000 gr/100m² lo que indica una calificación de mal a crítico en el índice de salud arrecifal y que algunos de los sitios tienen sobrepesca. Los sitios de las regiones Sur y Centro de Quintana Roo son los que a lo largo de la serie tiempo tienen coberturas más bajas y en la región Norte de Quintana Roo hay una disminución a partir de 2018, pero cuenta con biomasa mayor que las otras regiones (Fig. 13).

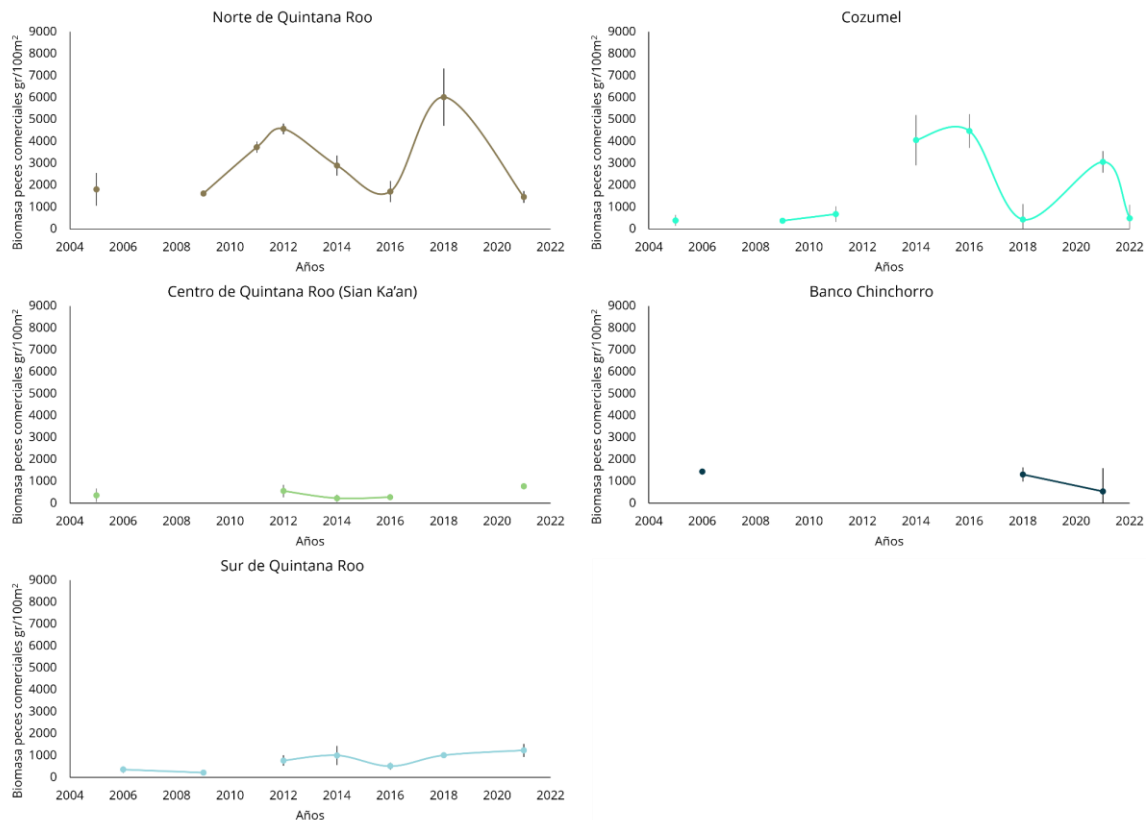


FIGURA 13. BIOMASA PROMEDIO DE PECES COMERCIALES AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

V.1.5. Índices de cobertura de coral

El Índice de Función Arrecifal es un indicador fundamental para comprender la evolución temporal de los arrecifes de coral. Este índice muestra cómo cambia la composición de especies y la cobertura relativa de estas, dando mayor peso a las especies que contribuyen más a la complejidad estructural del ecosistema. Los resultados revelan una tendencia general hacia la disminución del Índice de Función

Arrecifal en prácticamente todas las regiones, especialmente si se considera la tendencia de largo plazo. Sin embargo, también se observan variaciones significativas entre los periodos de monitoreo, lo que puede reflejar dinámicas en la composición de especies de coral y ciertos procesos de recuperación y pérdida en la cobertura de distintas especies (Fig. 14).

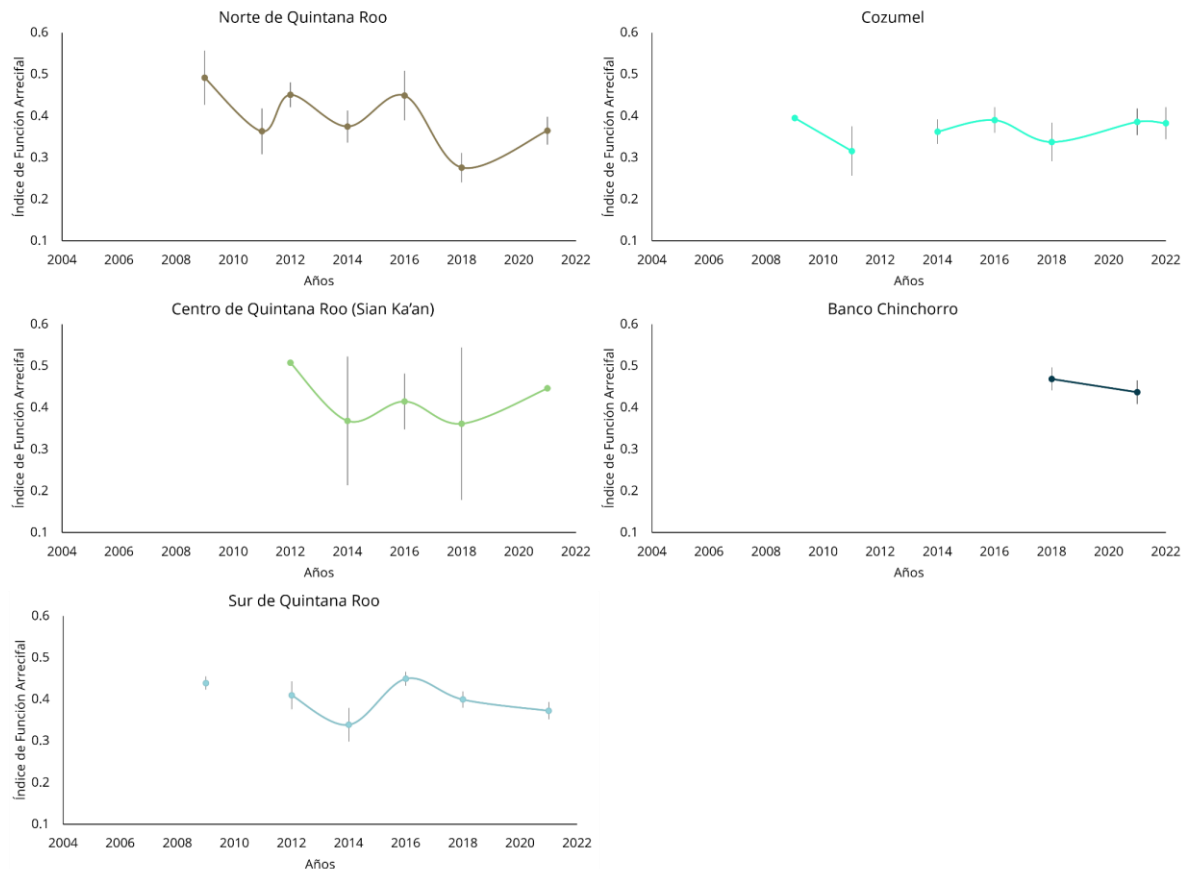


FIGURA 14. ÍNDICE DE FUNCIÓN ARRECIFAL PROMEDIO AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

Los indicadores de diversidad muestran un patrón similar al del Índice de Función Arrecifal, con una disminución a largo plazo y una pérdida considerable, especialmente a partir del año 2018 (Fig. 15-17). Esta disminución podría estar relacionada con el impacto causado por la enfermedad de pérdida de tejido coralino, que ha afectado negativamente a los arrecifes. Esta tendencia de pérdida de diversidad es consistente en todas las regiones, excepto en la zona Centro de Quintana Roo, donde puede haber factores locales o condiciones particulares que hayan contribuido a una mayor estabilidad en la diversidad de especies.

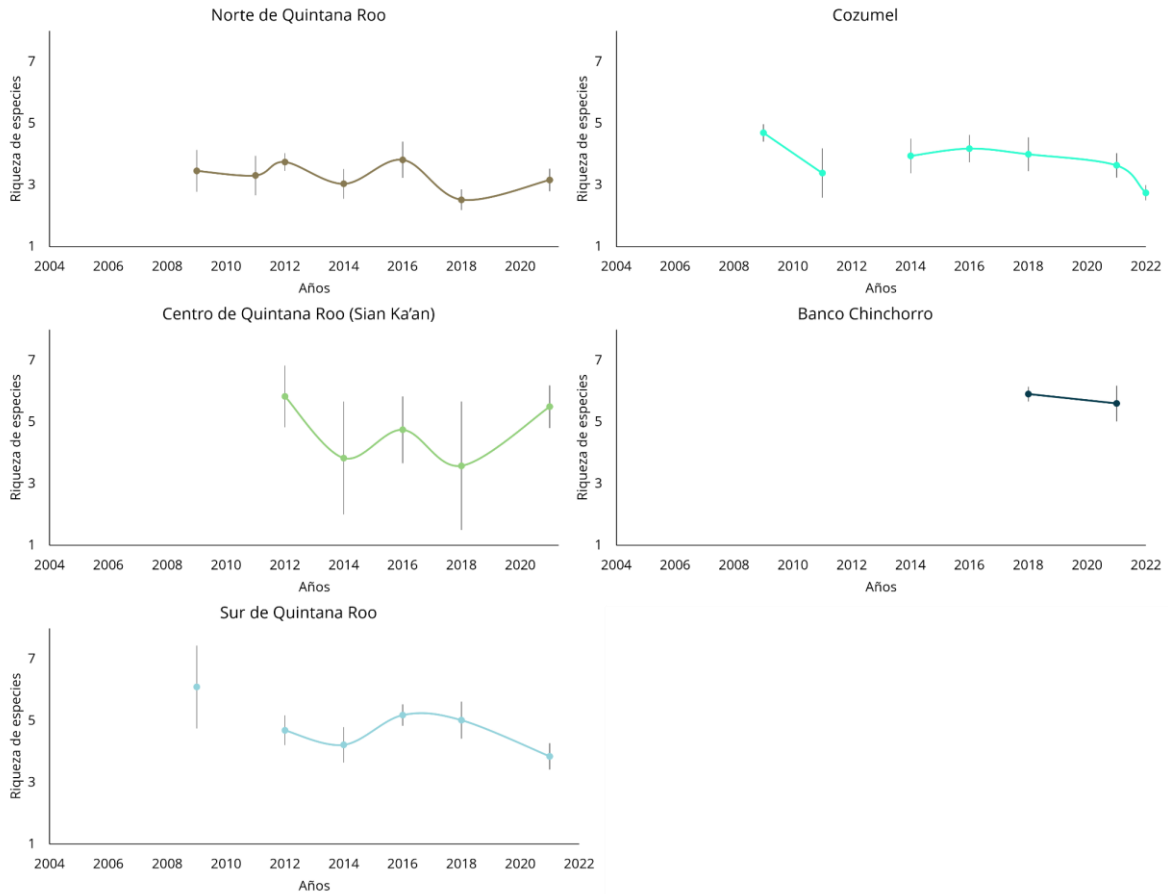


FIGURA 15. RIQUEZA PROMEDIO DE CORALES AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

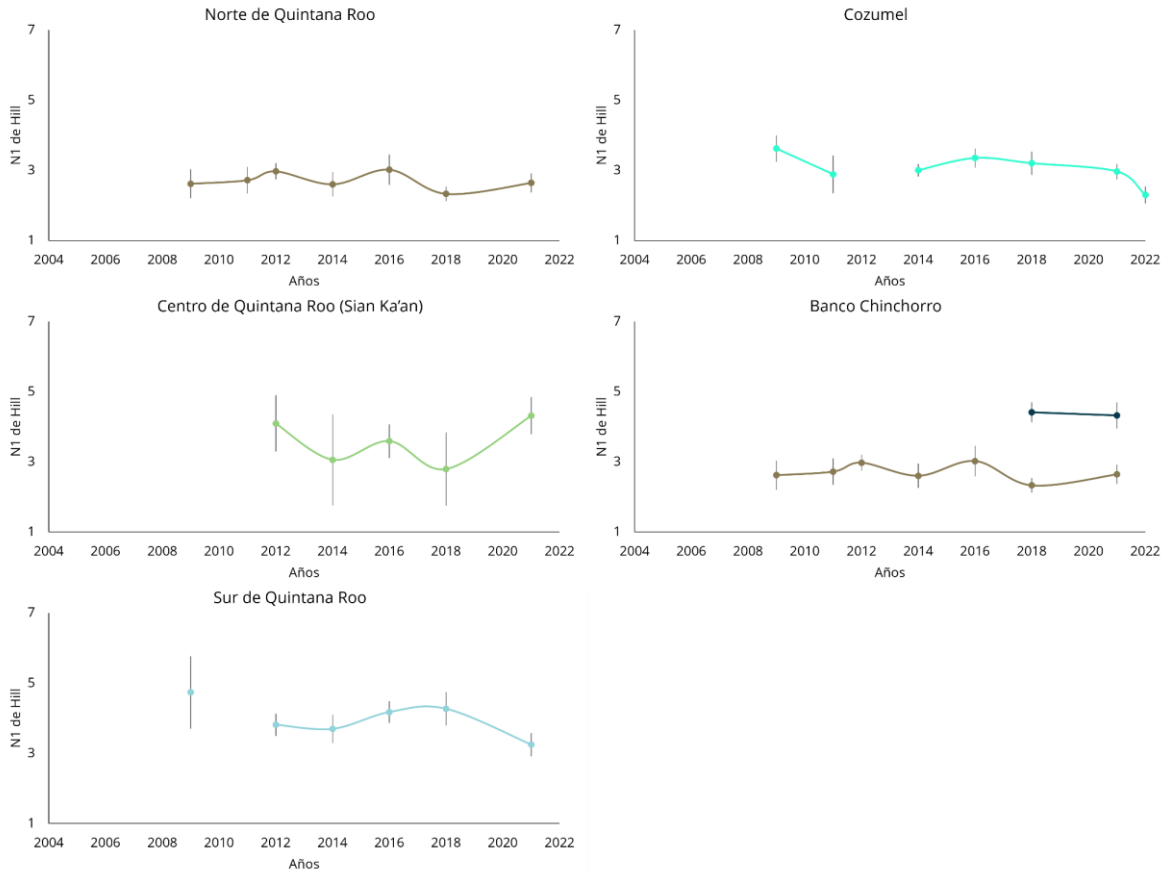


FIGURA 16. N1 DE HILL DE CORALES AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

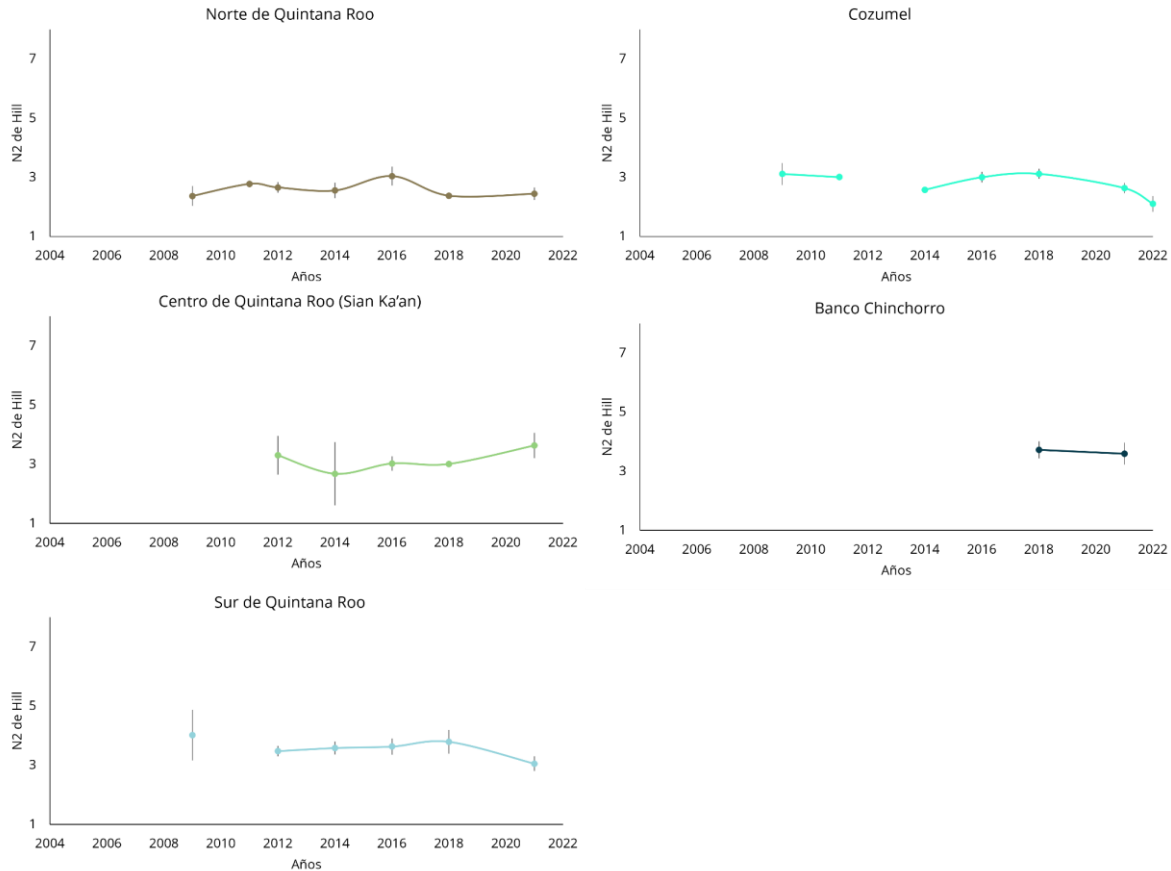


FIGURA 17. N2 DE HILL DE CORALES AL AÑO DE LAS REGIONES: NORTE DE QUINTANA ROO, COZUMEL, CENTRO DE QUINTANA ROO, BANCO CHINCHORRO, Y SUR DE QUINTANA ROO

Nota: los datos van de 2005-2022. Las barras negras representan el error estándar.

V.1.6. *Análisis estadísticos de indicadores ecológicos*

Los resultados de las pruebas estadísticas mostraron que en el caso de la cobertura de coral el Banco de Campeche es significativamente diferente a el Norte de Quintana Roo. De la misma forma, la biomasa de peces herbívoros es significativamente diferente en Cozumel en comparación de otras subregiones como el Banco de Campeche en Yucatán (Arrecife Alacranes), Banco Chinchorro y las regiones Norte, Centro y Sur de Quintana Roo. En cuanto a el IFA, este es significativamente diferente en Banco de Campeche en comparación de las regiones de Cozumel, el Centro y Norte de Quintana Roo. Mientras que en el caso de los indicadores de diversidad Banco Chinchorro es significativamente diferente al Norte de Quintana Roo (ver Anexo 4).

Es importante resaltar que, aunque se han identificado diferencias significativas en algunas variables, la interpretación de estas diferencias debe considerar el contexto

ecológico y las limitaciones del análisis. Dado que el tamaño de muestra no es excepcionalmente grande. Adicionalmente, es posible observar una elevada variación en diferentes valores incluso dentro de cada una de las subregiones (Fig. 18).

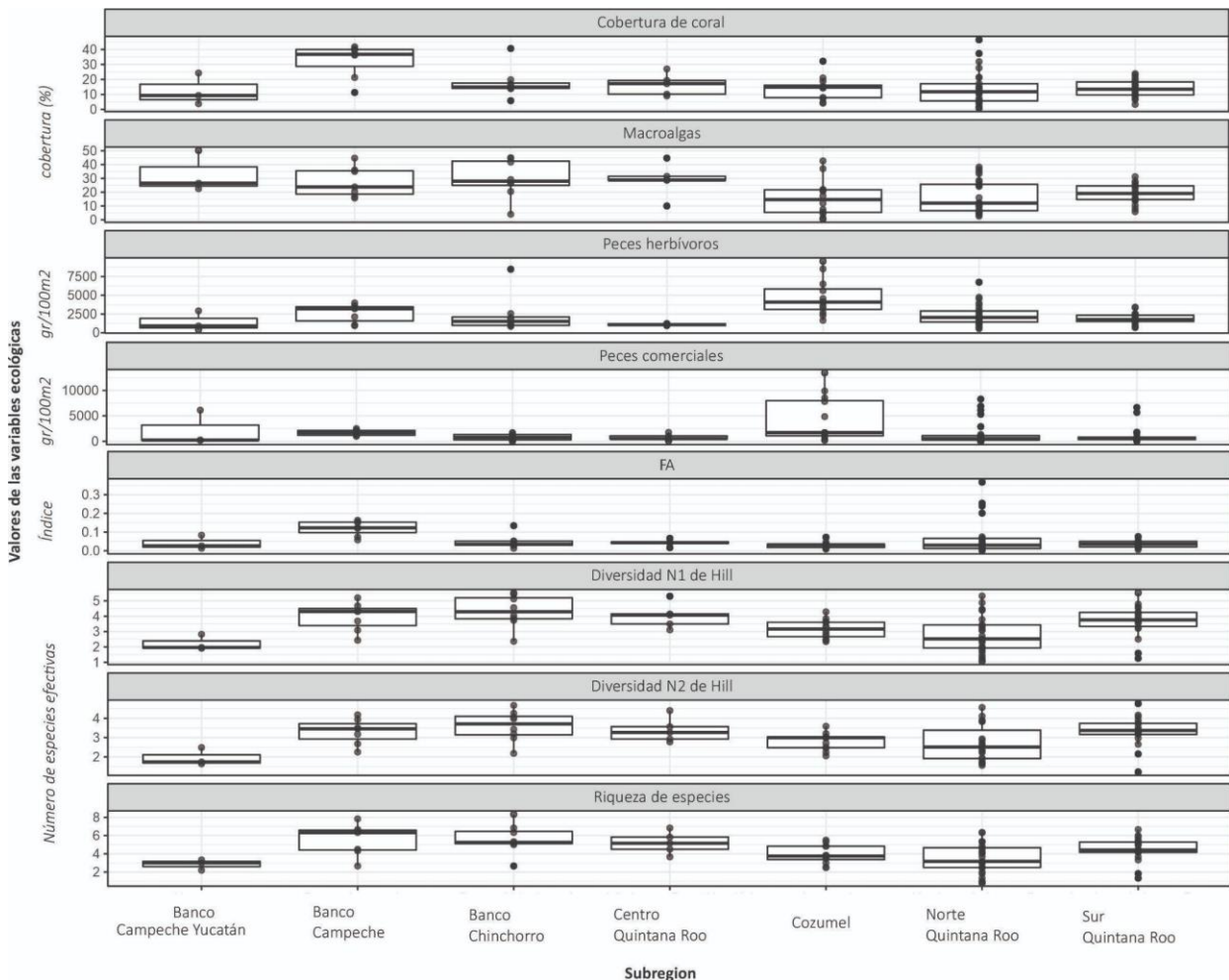


FIGURA 18. BOXPLOT DE LA COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS INDICADORES ECOLÓGICOS PARA CADA REGIÓN UTILIZADA EN ESTE ESTUDIO

En el caso de la comparación temporal, se observó que las variables que tuvieron un cambio significativo en el tiempo fueron la cobertura de coral y la riqueza de especies, ambas con un mismo patrón de incremento en los primeros periodos de tiempo hasta el 2018 y un posterior descenso en los valores de estas variables. Así como en la biomasa de peces herbívoros, en la cual se observó un incremento significativo especialmente en el año 2014 y un posterior descenso de los valores (Fig. 19). Nuevamente, es crucial recordar que las conclusiones basadas en estas comparaciones temporales deben ser tratadas con precaución debido al tamaño de muestra limitado y a posibles factores externos que podrían influir en los resultados a lo largo de los

años. Es recomendable considerar estos resultados como indicativos y abrir la puerta a investigaciones futuras con muestras más grandes para obtener conclusiones más sólidas y confiables sobre el estado y los cambios en los ecosistemas estudiados.

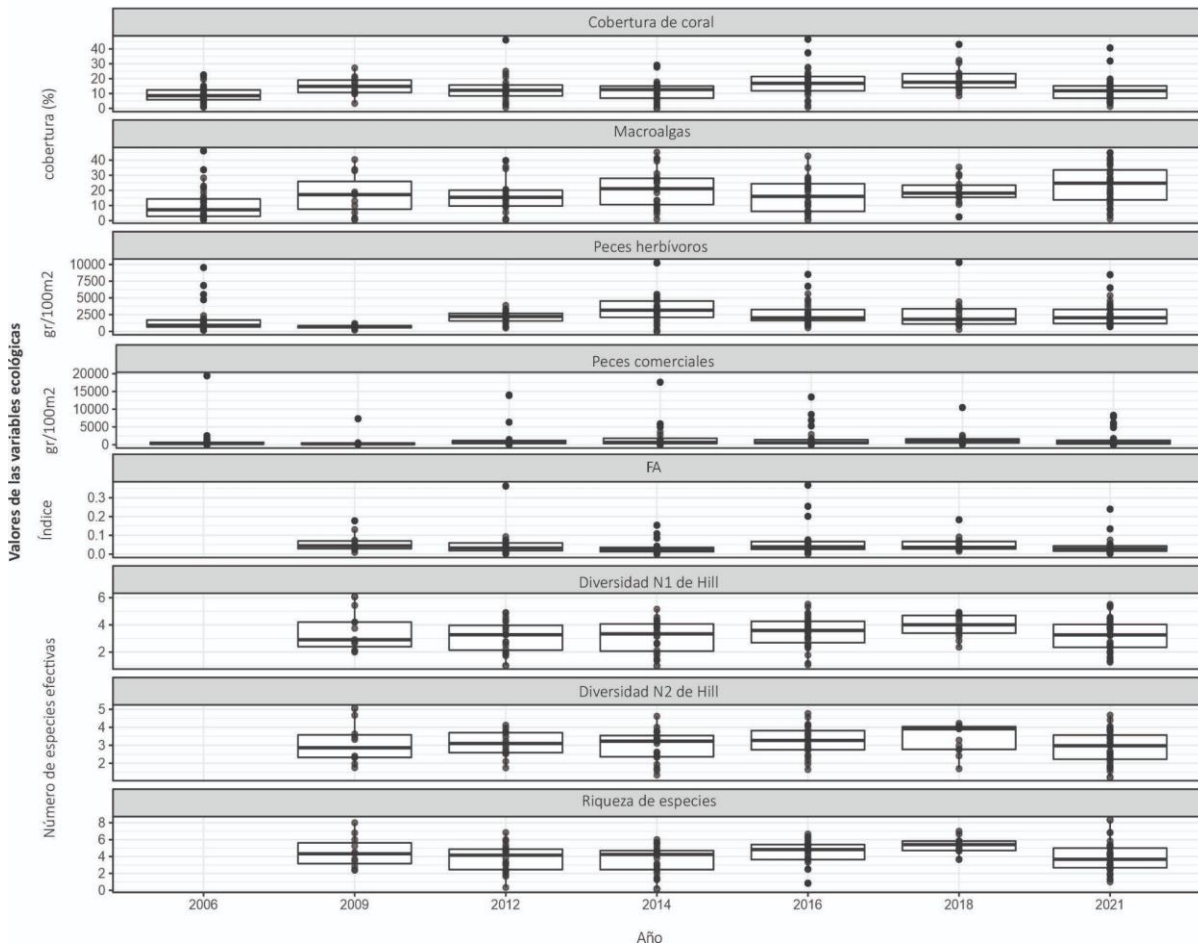


FIGURA 19. BOXPLOT DEL CAMBIO DE LOS DISTINTOS INDICADORES ECOLÓGICOS EN EL TIEMPO PARA LOS ARRECIFES DE QUINTANA ROO

V.2. Descripción de colecta de datos climáticos existentes a nivel estatal

Para comparar la calidad de los productos SIMAR y CRW, se eligió la boya de Cozumel de SIMAR para hacer una comparación con los datos satelitales de la NOAA. Para la boya de SIMAR de Cozumel, con las coordenadas: 20.389976, -87.042826, se extrajo la información de SST promedio anual y se extrajo la misma información para los datos de CRW para la misma coordenada de los años 1985 a 2022. Al evaluar la diferencia entre ambos productos se encontró que la diferencia es de 0.0773821 °C (Fig. 20). Por lo cual se decidió utilizar los datos que el CRW nos proporcionó para la sección de estrés térmico. En general, se observa un aumento en la temperatura de 1981 a 2023 para

todas las boyas utilizadas en la Península de Yucatán, el aumento varía entre 0.4°C y 1°C (Fig. 21). En la zona del Golfo se observa una mayor variación de temperatura entre años, entre la máxima y la mínima registradas, mientras que en el Caribe mexicano la temperatura presenta una menor variación.

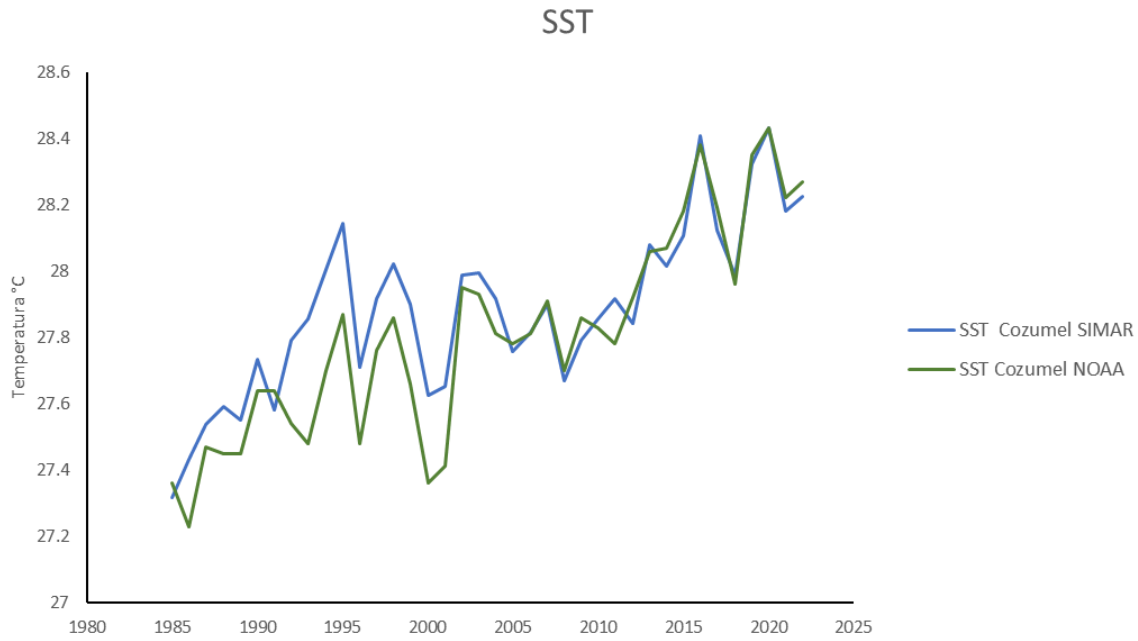


FIGURA 20. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MAR PROMEDIO ANUAL DE COZUMEL DE SIMAR Y DE NOAA

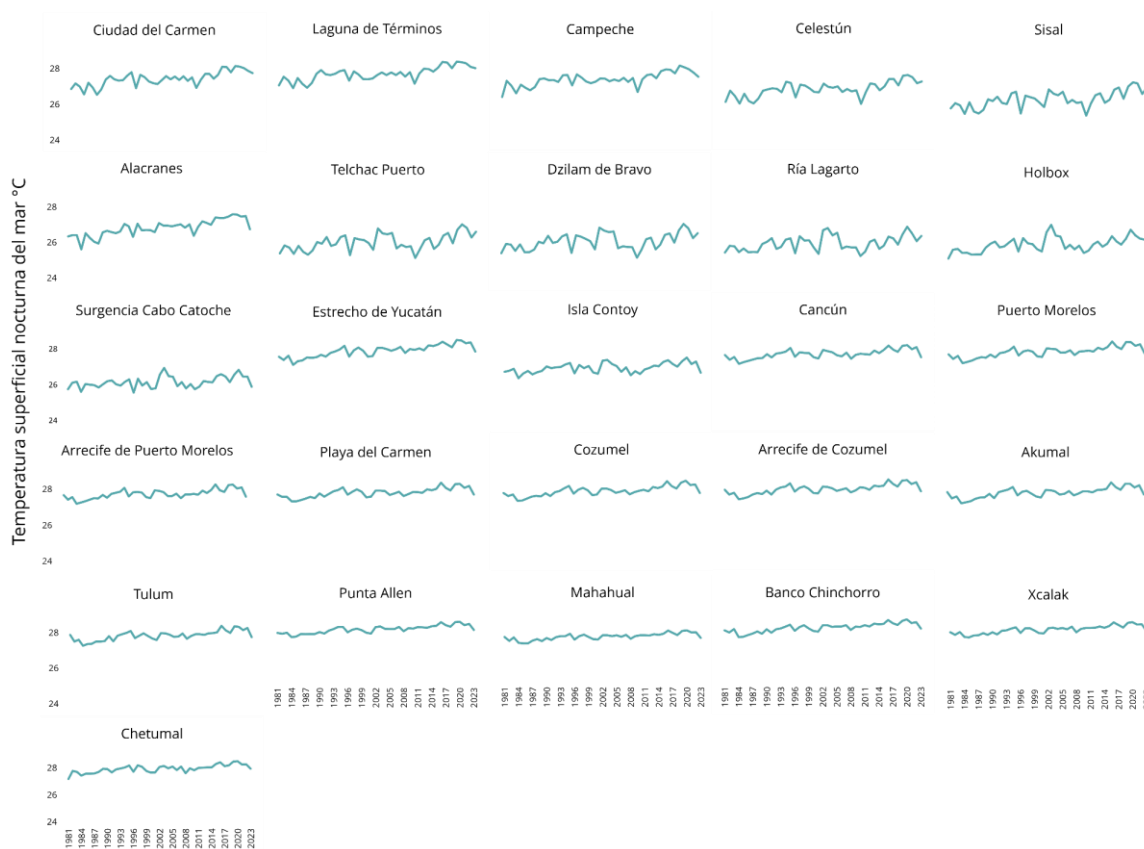


FIGURA 21. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MAR PROMEDIO ANUAL DE 1981-2023 DE LAS BOYAS SIMAR

V.3. Indicadores de sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa

V.3.1. Enfermedades de coral

V.3.1.1. Descripción

La enfermedad de pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus siglas en inglés) ha afectado gravemente a los corales en varias regiones del Caribe, incluida la parte que le toca a la Península de Yucatán. Fue identificada por primera vez en 2014 en las costas de Florida y desde entonces se ha registrado y ha causado una alta mortalidad de corales en diferentes zonas del Mar Caribe (Kramer et al., 2019). En la Península de Yucatán, se han registrado casos de SCTLD desde 2018, que comenzaron en el norte de Quintana Roo y se extendieron rápidamente por la costa de Quintana Roo y Cozumel (Álvarez-Filip et al., 2019; Estrada- Saldívar et al., 2021). Hasta septiembre de 2022 no se tenía registro de la enfermedad en Banco Chinchorro, pero en marzo de 2023 se

hicieron los primeros reportes, lo que indica que la enfermedad está presente en toda la costa de Quintana Roo y sus islas. A la fecha no se ha registrado la enfermedad en el Banco de Campeche, solamente en las distintas regiones de Quintana Roo (Fig. 22; Kramer et al., 2019).

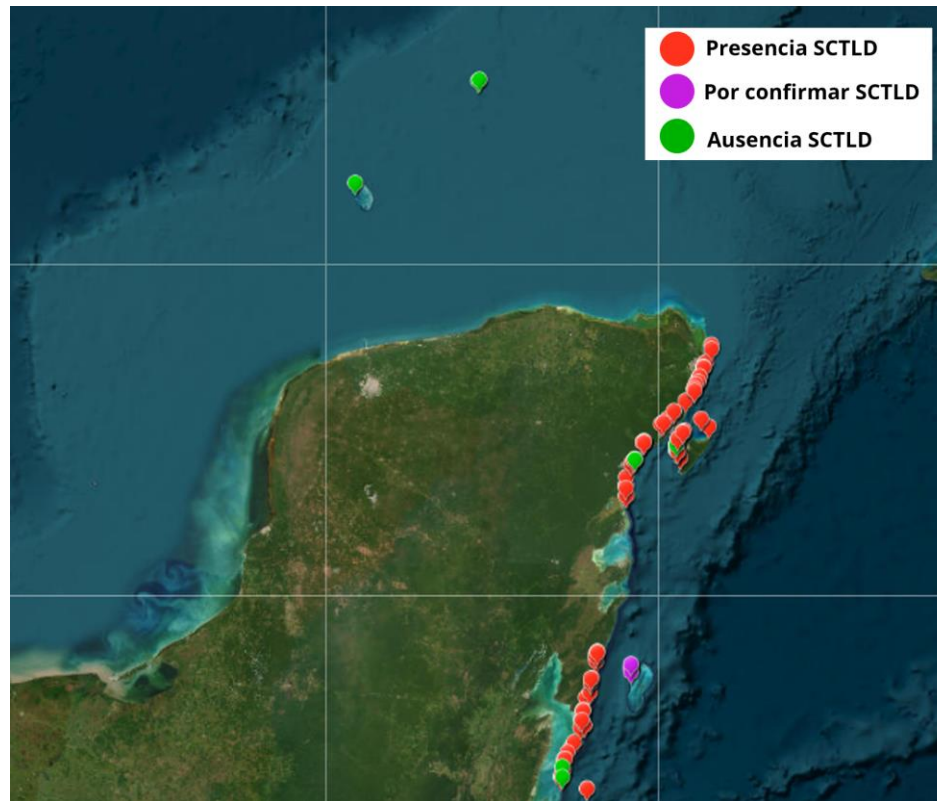


FIGURA 22. MAPA DE PRESENCIA DE LA ENFERMEDAD DE PÉRDIDA DE TEJIDO DEL CORAL DURO (SCTLD) EN LA ZONA DE ESTUDIO

Fuente: Kramer, P.R., Roth, K., y Lang, J. 2019. Map of Stony Coral Tissue Loss Disease Outbreak in the Caribbean. www.agrra.org. ArcGis Online.

V.3.1.2. *Patrones históricos (exposición)*

El Caribe se caracteriza por ser un “hot spot” para enfermedades coralinas (Weil, 2004), las cuales han causado más del 50-80% del declive en la cobertura de coral (Jackson et al., 2014). El primer brote de enfermedad masivo se registró en 1970 donde la enfermedad de la banda blanca diezmó las poblaciones de *A. palmata* y *A. cervicornis* (Gladfelter, 1982); después, en 1990, la enfermedad de la viruela blanca volvió a afectar gravemente las poblaciones de *Acropora* spp., mientras que la enfermedad de la banda amarilla afectó las poblaciones de *Orbicella* spp. (Gil-Agudelo et al., 2004; Cervino et al., 2001). En años más recientes la epizootia que ha afectado a las comunidades coralinas es la Enfermedad de Pérdida de Tejido de Coral Duro, conocida en inglés como Stony

Coral Tissue Loss Disease (SCTLD). Esta enfermedad ha diezmando las poblaciones de varias especies de coral constructores de arrecifes (Álvarez-Filip et al., 2022; Precht et al., 2016). Para el caso del Caribe mexicano, Álvarez-Filip y colaboradores (2019) realizaron un estudio en el cual observaron como el número de colonias enfermas de especies altamente susceptibles al SCTLD, aumentó drásticamente en 2018, año en el que se registró por primera vez el SCTLD (Fig. 23). Esta pérdida en la cobertura que ha derivado de la aparición de distintos brotes de enfermedades masivos ha llevado a un declive en la funcionalidad física del arrecife, ya que esta depende de una buena cobertura de corales constructores de arrecife, para poder acumular carbonato de calcio y brindar una adecuada complejidad estructural. En la figura 24 se puede observar un diagrama conceptual que Álvarez-Filip y colaboradores (2022) diseñaron para ejemplificar el declive de la función arrecifal a través del tiempo. Con base en esto se observa que las especies constructoras de arrecife (ej. *Acropora* y *Orbicella*) han disminuido debido a distintas enfermedades y a eventos de blanqueamiento, y cómo la contribución de otras especies ha aumentado, pero desafortunadamente no poseen las mismas características para reemplazar ese nicho. Para el caso del Banco de Campeche, el SCTLD no se ha registrado hasta el momento, por lo cual las poblaciones de corales constructores se encuentran en mejor condición que en el Caribe y podrían mantenerse si no llega la enfermedad a esa zona.

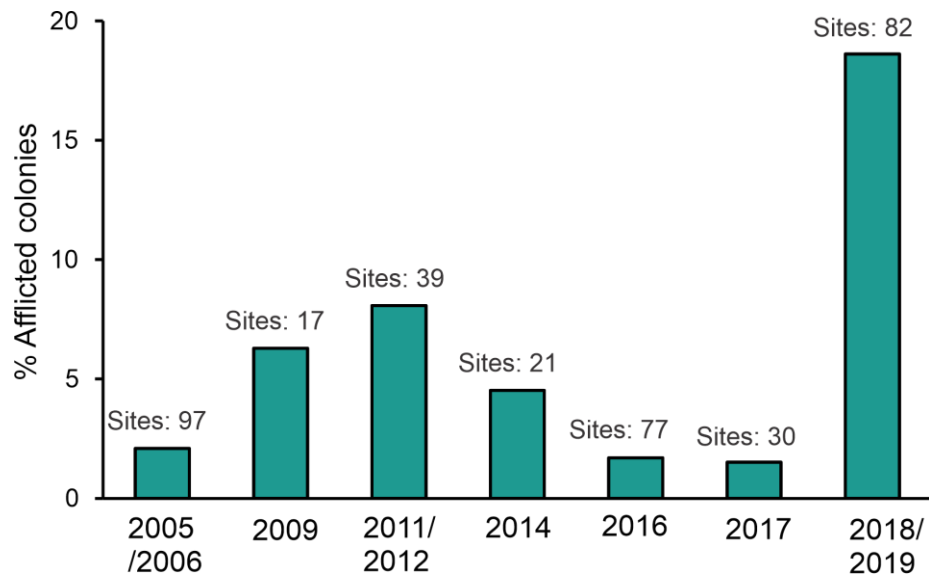


FIGURA 23. PREVALENCIA DE ENFERMEDADES DE 2005-2019 PARA EL CARIBE MEXICANO

Fuente: Tomado de Álvarez-Filip et al., 2019

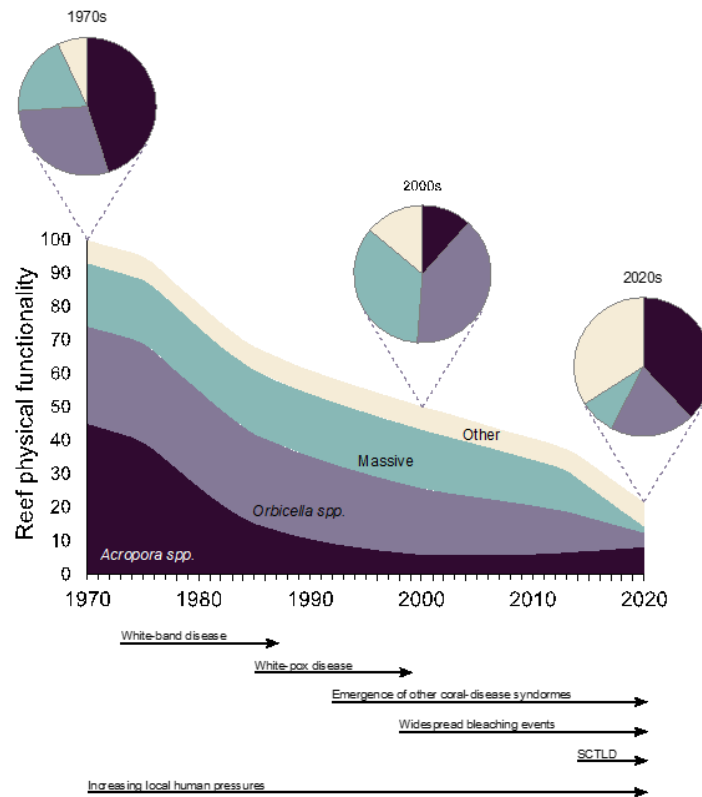


FIGURA 24. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA TRAYECTORIA A LARGO PLAZO DE LA FUNCIONALIDAD FÍSICA DE LOS ARRECIFES DEL CARIBE Y LOS IMPACTOS RECIENTES DEL SCTLD

Fuente: Tomado de Álvarez-Filip et al., 2022

V.3.1.3. Evaluación de sensibilidad de enfermedades en arrecifes

La sensibilidad de los arrecifes de coral a las enfermedades se refiere al grado de vulnerabilidad que presentan antes las distintas enfermedades. Debido a que en los últimos años el SCTLD ha sido la enfermedad emergente que más ha impactado a los corales del Caribe, el análisis se realizó en torno a esta enfermedad. Cabe destacar que las especies de coral escleractinios tienen distintas características de acuerdo con su genética y familias taxonómicas, por lo cual algunas especies pueden ser más susceptibles a ciertas enfermedades que otras. A partir de esto la diversidad de especies que exista en un arrecife puede influir en su resiliencia frente a los brotes de enfermedades. Para el Caribe mexicano existen diversos estudios que han evaluado la susceptibilidad de las especies de coral utilizando el porcentaje de colonias enfermas y recientemente muertas en la región (Álvarez-Filip et al., 2018; 2022; Estrada Saldívar et al., 2021), entre las especies más afectadas destacan *Dendrogyra cylindrus*, *Pseudodiploria strigosa*, *Siderastrea siderea*, *Diploria labyrinthiformis* y *Colpophyllia natans*, las cuales tienen un porcentaje de afectación mayor al 12% (Tabla 11).

TABLA 11. Especies SUSCEPTIBLES A SCTLD Y SU GRADO AFECTACIÓN

Especie	Afectación a la enfermedad SCTLD (%)
<i>Dendrogyra cylindrus</i>	43
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	21
<i>Siderastrea siderea</i>	18
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	16
<i>Colpophyllia natans</i>	13
<i>Pseudodiploria clivosa</i>	12
<i>Eusmilia fastigiata</i>	11
<i>Orbicella faveolata</i>	11
<i>Montastraea cavernosa</i>	9
<i>Dichocoenia stokesii</i>	8
<i>Orbicella annularis</i>	7
<i>Meandrina spp.</i>	4
<i>Mycetophyllia spp.</i>	4
<i>Isophyllia spp.</i>	3
<i>Orbicella franksi</i>	2

Fuente: Tomado de Álvarez-Filip et al., 2022

Para establecer la sensibilidad de las regiones respecto a las enfermedades coralinas, se obtuvieron los datos de cobertura de coral para las especies susceptibles que se localizan en cada una de las regiones de la Península de Yucatán, así como la lista de especies susceptibles a la enfermedad tomado de Álvarez-Filip y colaboradores (2022) en el Caribe Mexicano. En el Banco de Campeche aún no se tiene registro de esta enfermedad, pero tiene altos porcentajes de especies de coral que son altamente susceptibles como son: *Montastraea cavernosa*, *Orbicella faveolata*, *O. franksi* y *Colpophyllia natans*, lo cual vuelve a la región altamente vulnerable en caso de que la enfermedad se presentara en estos sitios (Anexo 3).

La sensibilidad a la enfermedad de pérdida de tejido coralino (SCTLD) exhibe una marcada variación espacial que está estrechamente vinculada a la composición de

especies de coral en diferentes regiones. A pesar de que el SCTLD no se ha registrado en el Banco de Campeche, con base en este análisis, esta área destaca como una de las más sensibles, tanto en términos de máxima sensibilidad absoluta como relativa (Fig. 25). Esto está dado debido a la composición de especies que existe en esta región y a la elevada cobertura de coral, la cual está compuesta por corales meandroides, que son particularmente susceptibles a la SCTLD. Otra zona altamente sensible es Banco Chinchorro la cual hasta marzo de 2023 no había registrado la presencia de la enfermedad. Sin embargo, un fenómeno intrigante se observa en las regiones que de acuerdo con el análisis son menos sensibles, pero de acuerdo con los datos ecológicos experimentaron impactos significativos por la aparición de la enfermedad, como es el caso del Norte de Quintana Roo y Cozumel (Fig. 25). Estaba baja sensibilidad puede estar dado por el declive en la cobertura de las especies sensibles y que las colonias restantes pudieran haber desarrollado una mayor resistencia relativa. Estos ejemplos ilustran la complejidad de las interacciones entre la enfermedad y la composición de especies, sugiriendo una posible evolución de la susceptibilidad en el tiempo en respuesta a las perturbaciones locales.

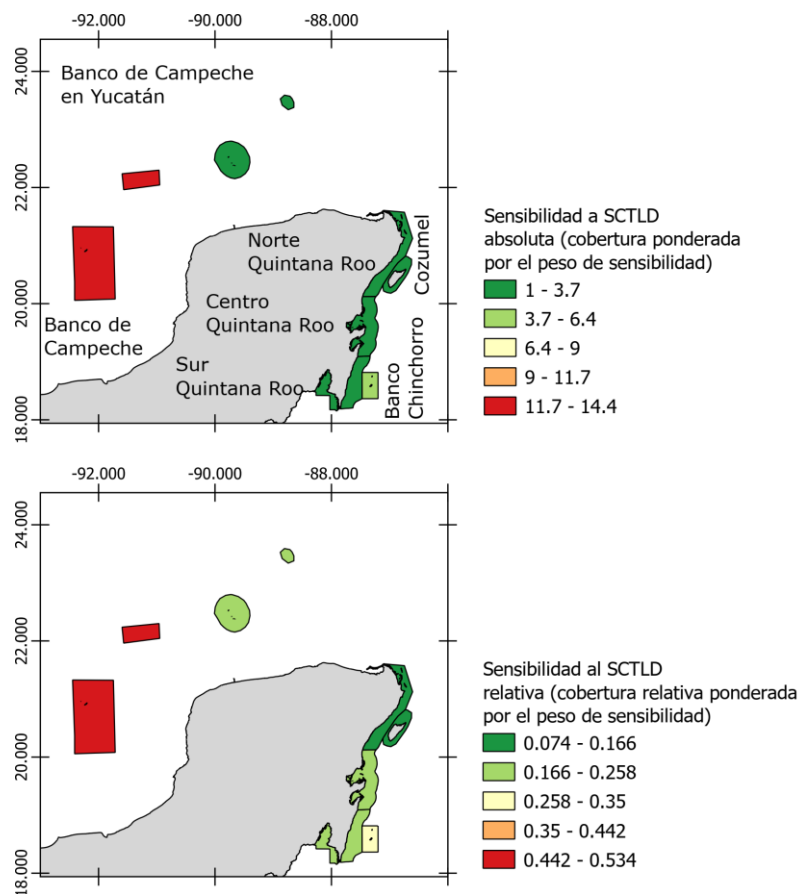


FIGURA 25. SENSIBILIDAD ESPACIAL RESPECTO AL SCTLD PARA LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

V.3.1.4. Evaluación de capacidad adaptativa de enfermedades en arrecifes

La capacidad adaptativa se refiere a la habilidad de los arrecifes de coral para recuperarse y adaptarse después de un brote de enfermedades. Algunos aspectos por considerar incluyen:

Especies resistentes: Algunas especies de coral pueden ser más resistentes y no enfermarse, para el caso de SCTLD hay especies que fueron poco susceptibles o que no presentaron signos de la enfermedad (Tabla 12; Álvarez-Filip et al. 2022). La diversidad genética también puede influir en la capacidad de adaptación, se ha reportado que individuos de coral cerebro *Pseudodiploria strigosa* después de estar enfermas de SCTLD la enfermedad paró y después 4 años aún se registraron colonias vivas (Camacho-Vite et al., 2022).

TABLA 12. LISTA DE ESPECIES QUE SON POCO SUSCEPTIBLES A LA SCTLD

Especie	Susceptibilidad
<i>Agaricia agaricites</i>	Baja
<i>Agaricia tenuifolia</i>	Baja
<i>Branching Porites</i>	Baja
<i>Helioseris cucullata</i>	Baja
<i>Porites astreoides</i>	Baja
<i>Siderastrea radians</i>	Baja
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	Baja
<i>Acropora cervicornis</i>	No
<i>Acropora palmata</i>	No
<i>Favia fragum</i>	No
<i>Madracis spp.</i>	No
<i>Mussa angulosa</i>	No
<i>Scolymia spp.</i>	No
<i>Solenastrea bournoni</i>	No

Fuente: Tomado de Álvarez-Filip et al., 2022.

De igual forma la relación que existe entre los corales y otros organismos en el arrecife puede influir en cómo se propagan las enfermedades, ya que algunas especies pueden ser vectores, como es el caso del pez mariposa (Chaetodontidae) o el gusano de fuego

(*Hermodice carunculata*) los cuales han sido considerados como posibles vectores de la enfermedad SCTLD (Aeby et al., 2019; Titus et al., 2022)

Otro factor determinante para la salud coralina es la calidad del agua, cuando esta se deteriora debido a la contaminación o el aumento de nutrientes, los corales pueden sufrir estrés. Agua contaminada o rica en nutrientes puede fomentar el crecimiento excesivo de algas y bacterias, compitiendo con los corales por recursos y aumentando la probabilidad de que se propaguen enfermedades. La sedimentación excesiva puede ser causada por la erosión del suelo en tierras adyacentes, la construcción costera y la actividad humana. Cuando los sedimentos se depositan en los arrecifes de coral, pueden sofocar a los corales y bloquear la luz solar necesaria para la fotosíntesis de las algas simbióticas que viven en ellos. Esta falta de luz y el aumento del estrés pueden debilitar la salud de los corales, lo que los hace más susceptibles a las enfermedades. Además, los sedimentos transportan patógenos y nutrientes, lo que puede desencadenar brotes de enfermedades y promover su propagación.

V.3.1.5. Proyecciones

Es probable que el aumento de la temperatura del mar aumente la frecuencia de los brotes de enfermedades que afectan a los corales formadores de arrecifes. Maynard y colaboradores (2015) evaluaron distintos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) y compararon las proyecciones para el inicio de condiciones que conducen a enfermedades y al blanqueamiento, y concluyeron que en las próximas décadas las enfermedades coralinas causarán tanta mortalidad como los eventos de blanqueamiento. Se estima que, en 2100, aproximadamente 70% de los corales a nivel mundial presentaría alguna enfermedad (Burke et al., 2023). Cabe resaltar que estas proyecciones pueden ser prevenidas si se realizan acciones para reducir el estrés causado por actividades antropogénicas y mitigar el aumento de la temperatura del mar.

V.3.2. Estrés térmico

V.3.2.1. Descripción (exposición)

La exposición al estrés por calor es un factor preocupante que puede tener un impacto significativo en los arrecifes de coral, especialmente en términos de blanqueamiento. Desde 1986 hasta 2022, se ha observado una exposición máxima al estrés por calor, medida en DHW (Grados Semanales de Calor Acumulativo).

Una zona notable con una mayor exposición a valores elevados de estrés por calor es el Banco de Campeche, específicamente en Cayo Arcas. Aquí se ha registrado una

exposición significativa al estrés por calor durante la serie de tiempo. Además, en la plataforma de Yucatán, donde hay pocos arrecifes presentes; también se han observado niveles muy altos de estrés por calor. En el estado de Quintana Roo, se han identificado regiones con una exposición severa al estrés por calor. Estas áreas incluyen la parte central, como Sian Ka'an, así como el sur y, especialmente, el Banco Chinchorro. Estos lugares han experimentado altos niveles de estrés por calor, lo que representa una amenaza para los arrecifes de coral en esas regiones. Es importante destacar que, si bien las regiones mencionadas fueron las más afectadas, prácticamente todos los arrecifes de la Península de Yucatán muestran valores superiores a 5 DHWs (Fig. 26). Esto indica que la exposición al estrés por calor es una preocupación generalizada en la región.

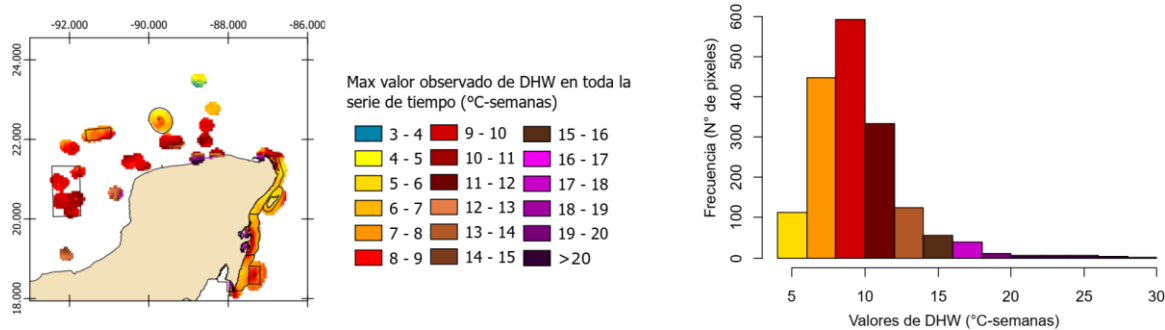


FIGURA 26. MÁXIMO VALOR DE DHW OBSERVADO EN TODA LA SERIE DE TIEMPO (MAGNITUD DE EXPOSICIÓN AL ESTRÉS POR CALOR)

Los patrones de frecuencia de eventos de riesgo de blanqueamiento son similares a los de la exposición al estrés por calor (Fig. 27). Una vez más, la zona del Banco de Campeche destaca como una región con una mayor frecuencia de eventos de riesgo al blanqueamiento. En particular, los arrecifes de Alacranes, así como los cayos Triángulos y Arenas han experimentado eventos frecuentes con valores superiores a 4 °C-semanas, lo que indica un riesgo significativo para la salud de los corales en estas regiones. En Quintana Roo, el Banco Chinchorro también se destaca como un sitio con una frecuencia notable de eventos de riesgo de blanqueamiento. Esto implica que los corales en estas zonas están expuestos de manera recurrente a condiciones que aumentan su vulnerabilidad al blanqueamiento.



FIGURA 27. NÚMERO DE EVENTOS CON EXPOSICIÓN AL RIESGO DE BLANQUEAMIENTO

Al analizar los patrones espaciales, se observa que cerca de la mitad de las regiones estudiadas no han sido expuestas a eventos de riesgo de la mortalidad (Fig. 28). Esto puede ser un alivio relativo, ya que estas zonas han experimentado niveles de estrés por calor por debajo del umbral crítico de 8 °C-semanas. Sin embargo, existen zonas donde se han observado mayores eventos de riesgo de mortalidad. El Banco de Campeche, la zona central de Quintana Roo y el Banco Chinchorro son regiones que se destacan por su exposición significativa a estos eventos extremos. En estos sitios, los corales han estado expuestos a condiciones extremas que pueden resultar en una alta mortalidad de los corales.

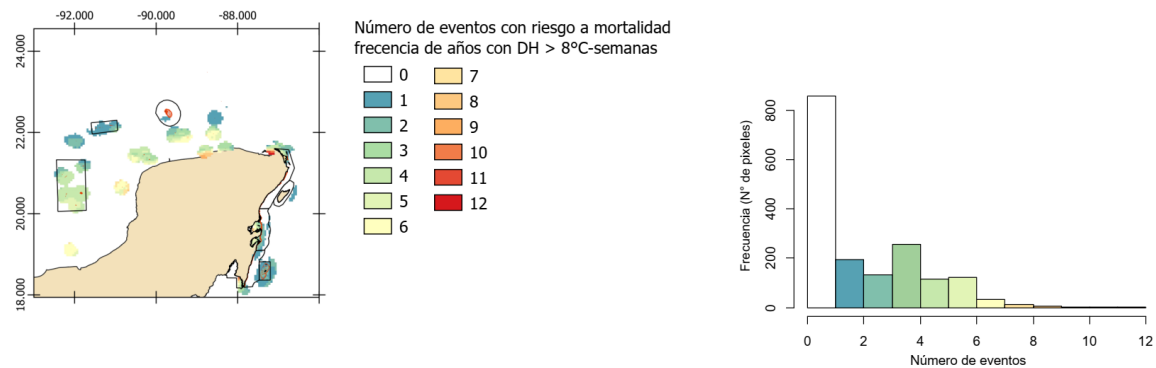


FIGURA 28. NÚMERO DE EVENTOS CON EXPOSICIÓN DE RIESGO DE MORTALIDAD

Estos hallazgos resaltan la necesidad de prestar atención no sólo a la exposición al estrés por calor, sino también a la frecuencia de eventos de riesgo de blanqueamiento y mortalidad. La zona del Banco de Campeche, en particular los Arrecifes Alacranes, así como los Cayo Triángulos y Cayo Arenas, y el Banco Chinchorro en Quintana Roo requieren medidas especiales de protección y mitigación para preservar la salud y la resiliencia de los corales en estos sitios ante el blanqueamiento y la vulnerabilidad al estrés por calor. Es importante destacar que, si bien una parte considerable de las

regiones analizadas no ha experimentado eventos de riesgo de mortalidad, las áreas mencionadas requieren una atención especial.

V.3.2.2. Patrones históricos (exposición)

El análisis de la exposición al estrés por calor revela que el año en el cual se registró la mayor exposición desde 1986 fue 2021. Más de una tercera parte de las zonas analizadas mostraron niveles máximos de exposición durante ese año. Además, otros años que se destacan por su alta exposición son 2005, 2016 y 2020, que representan aproximadamente 20% del área para cada uno de esos años (Fig. 29). Estos resultados subrayan que la zona de los arrecifes de la Península de Yucatán ha experimentado una mayor exposición durante eventos recientes, especialmente en los últimos 10 años. En trabajos anteriores ya se ha identificado a la región del SAM y del Golfo de México como zonas de estrés por calor emergente (Muñiz-Castillo et al., 2019). Añadiendo que el evento del año 2005 fue un evento de gran magnitud que afectó a todo el Caribe, presentándose un blanqueamiento moderado en algunas regiones de Quintana Roo (Eakin et al., 2010).

Los patrones espaciales revelan una alta variación en relación con el año con la mayor exposición al estrés por calor en el Banco de Campeche (Fig. 29). En el caso de Cayo Arcas, se observa que algunos de los últimos años han presentado una mayor magnitud de estrés por calor. Por otro lado, en el Arrecife Alacranes, los eventos destacados fueron los años 2015 y 2016, que mostraron niveles particularmente elevados de exposición. Registros muestran que, a pesar de haberse presentado un estrés por calor considerable en el Arrecife Alacranes, la afectación por blanqueamiento fue de moderada a baja en gran parte de las regiones monitoreadas durante el 2015 (Muñiz-Castillo y Arias-González, 2021). En el caso de Cayo Arenas, 2005 fue el año en el que se registró la mayor exposición al estrés por calor. En cuanto a Quintana Roo, la gran mayoría de los arrecifes han experimentado una mayor exposición durante el periodo de 2020 y 2021. Estos años han sido particularmente preocupantes en términos de estrés por calor en la región. Además, algunas regiones también se vieron afectadas durante el evento de larga duración que ocurrió entre 2015 y 2017.

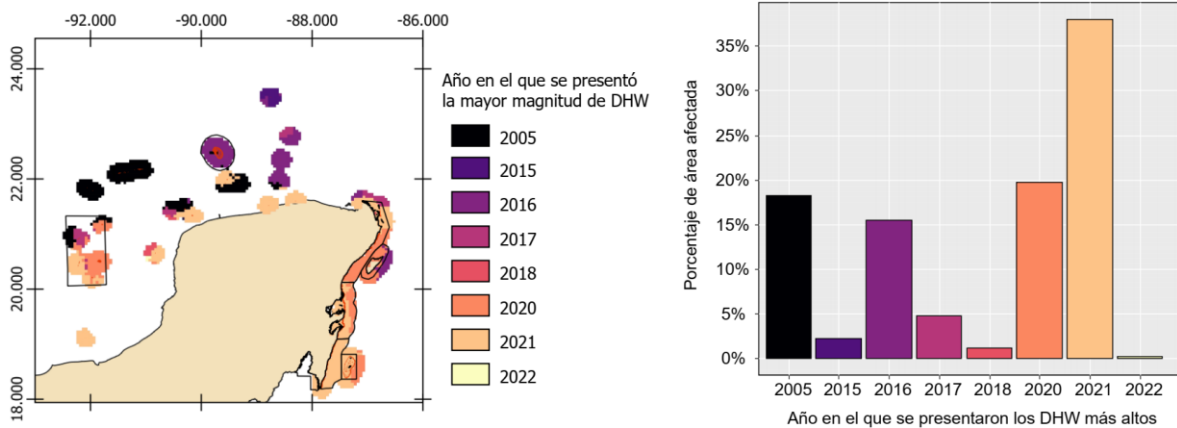


FIGURA 29. AÑO EN EL QUE SE PRESENTÓ LA MÁXIMA EXPOSICIÓN AL ESTRÉS POR CALOR EN EL CARIBE Y BANCO DE CAMPECHE

Los patrones de exposición al estrés por calor en los eventos de 2005, 2015, 2016, 2019 y 2020 muestran una variabilidad significativa en los impactos observados en los arrecifes de la Península de Yucatán (Fig. 30). A pesar de que el evento del año 2005 fue un evento de gran magnitud que afectó a todo el Caribe, en el caso de los arrecifes de la Península de Yucatán, no se observó una afectación muy severa en general, a excepción de algunos arrecifes en la plataforma de Yucatán. En contraste, los eventos del 2015 y 2016 mostraron una mayor afectación en la región, especialmente en la zona Norte de Quintana Roo y los arrecifes de Cayo Arenas, Cayo Arcas y Arrecife Alacranes. Estos años destacaron por presentar niveles particularmente elevados de exposición al estrés por calor, lo que probablemente generó condiciones desfavorables para la salud de los arrecifes en esas regiones específicas. El evento del 2019 también tuvo un impacto considerable en los arrecifes de Quintana Roo, lo que indica que este año fue especialmente preocupante en términos de estrés por calor en la región. Finalmente, en el evento de estrés por calor del 2020, gran parte de los arrecifes de la región se vieron considerablemente afectados. Este año en particular, al igual que el 2021, fue especialmente notorio en términos de exposición al estrés por calor, y la amplia afectación en los arrecifes sugiere que fue un periodo de gran desafío para la salud y la supervivencia de los ecosistemas coralinos en la Península de Yucatán.

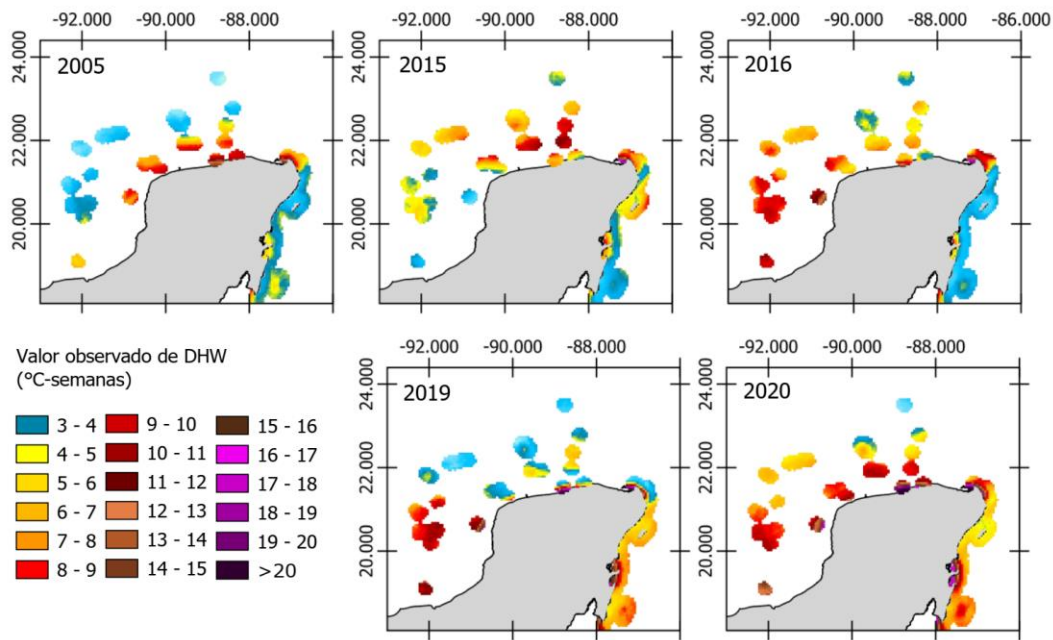


FIGURA 30. ESTRÉS POR CALOR EN LOS EVENTOS DE 2005, 2015, 2016, 2019 Y 2020

El análisis de la serie de tiempo completa revela varios aspectos destacados sobre la exposición al estrés por calor en la región de la Península de Yucatán. En primer lugar, se ha observado un notable incremento en la exposición al estrés por calor en todas las regiones analizadas a partir del año 2003 (Fig. 31). Este aumento sostenido sugiere que las condiciones climáticas y ambientales han experimentado cambios significativos en las últimas décadas, lo que ha llevado a una mayor presión sobre los arrecifes de la región (Muñiz-Castillo et al., 2019).

En segundo lugar, se ha notado que muchos de los eventos de estrés por calor tienden a tener una duración de entre dos años o más, especialmente en las últimas décadas. Por ejemplo, en el caso del evento del 2005, la elevada exposición al estrés por calor se observó desde el año 2004, lo que afectó particularmente a los arrecifes del Banco de Campeche, como Arrecife Alacranes, Cayo Arenas, Cayo Arcas y Cayo Triángulos. Este patrón de eventos prolongados también se ha hecho evidente en otros periodos, como los sucedidos entre 2008 y 2011, 2014 y 2017, y finalmente entre 2019 y 2020.

Otro aspecto relevante es que, a través del análisis de las series de tiempo, se ha identificado que algunos arrecifes han experimentado una exposición considerable al riesgo de mortalidad, especialmente aquellos ubicados en el Banco de Campeche y el arrecife de Banco Chinchorro. Estos arrecifes han mostrado niveles críticos de estrés por calor, que alcanzan valores que superan los límites considerados como altamente perjudiciales para la supervivencia de los corales ($DHW > 8$ °C-semanas).

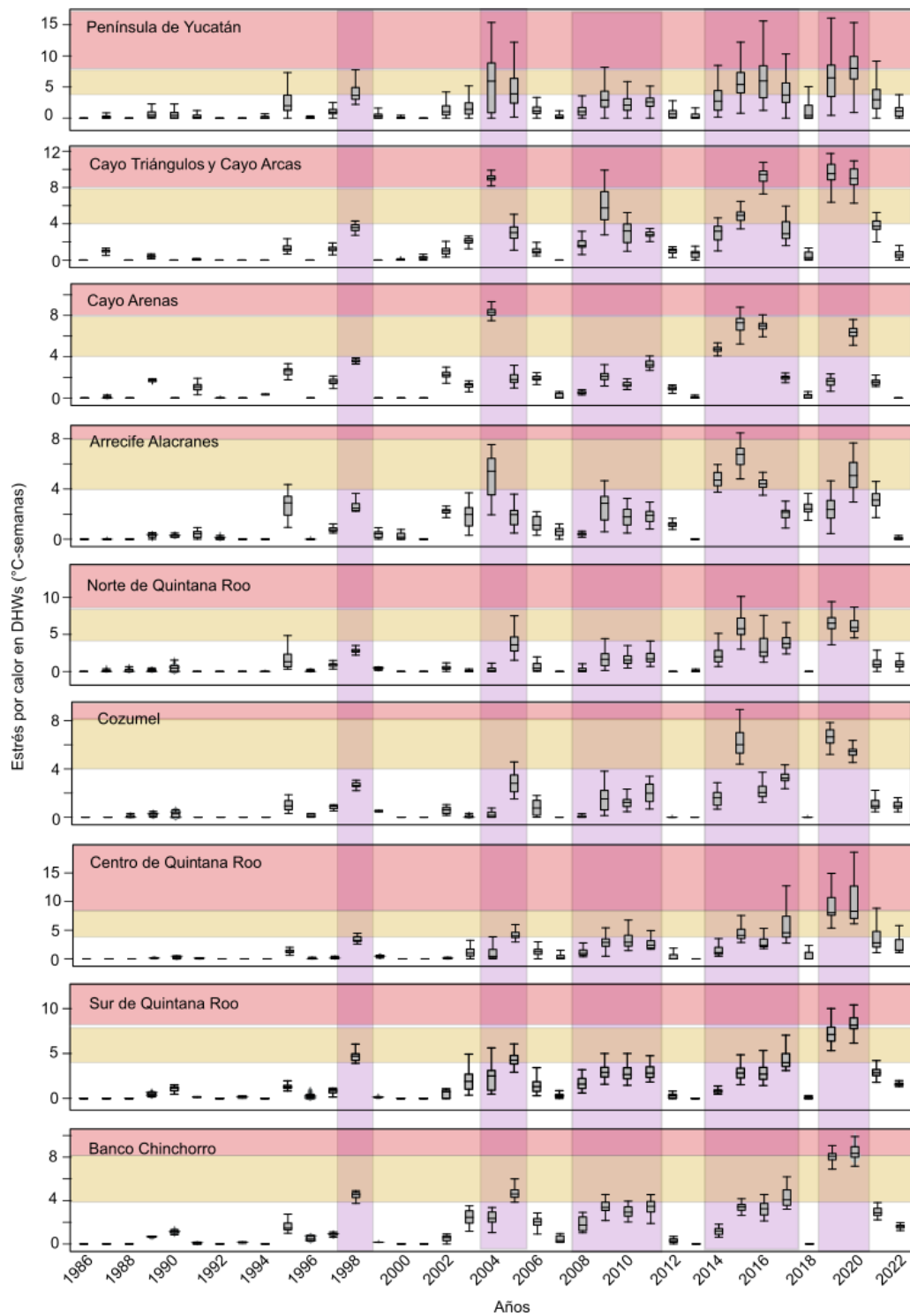


FIGURA 31. SERIES DE TIEMPO DE LOS MÁXIMOS DHW OBSERVADOS EN LOS DIFERENTES ARRECIFES

V.3.2.3. *Proyecciones (exposición)*

Las proyecciones del estrés por calor y la probabilidad de eventos de blanqueamiento en los arrecifes de la región de la Península de Yucatán han sido abordadas con base en información científica relevante, particularmente, en la publicación realizada por Dixon y colaboradores (2022) "Future loss of local-scale thermal refugia in coral reef ecosystems". En este estudio desarrollaron diferentes proyecciones considerando distintos escenarios de calentamiento global para evaluar cómo esto afectaría a los arrecifes en el futuro. Mediante una interpolación que generó un gradiente continuo, se pudo analizar el impacto del aumento de la temperatura del agua en la probabilidad de eventos de blanqueamiento.

Incluso bajo un escenario considerado "conservador" con un incremento de 1.5 °C, se observó que la gran mayoría de los arrecifes de la región podrían verse expuestos constantemente a eventos de riesgo de blanqueamiento (valores > 4 °C-semanas; Fig. 32). La probabilidad de que estos eventos ocurran de manera constante osciló entre 0.4 y 0.7, lo que indica un riesgo significativo para la salud y resiliencia de los corales en esta situación.

Si el calentamiento global alcanzara un aumento de 2.0 °C, la probabilidad de eventos de blanqueamiento aumentaría ligeramente en comparación con el escenario de 1.5 °C, siendo los arrecifes del Banco de Campeche los más vulnerables. Estos resultados resaltan la sensibilidad de los arrecifes a incluso pequeñas diferencias en el calentamiento global, lo que indica la necesidad de abordar urgentemente el cambio climático y sus impactos en los ecosistemas marinos.

Sin embargo, la situación se vuelve aún más preocupante bajo un escenario de calentamiento de 3.0 °C. Las proyecciones muestran que prácticamente todos los arrecifes de la región presentarían una probabilidad igual o mayor a 0.8 de eventos de blanqueamiento constantes. Esta elevada vulnerabilidad pone en peligro la supervivencia misma de los ecosistemas coralinos de la Península de Yucatán, lo que resalta la urgencia de tomar medidas efectivas para mitigar el cambio climático y proteger estos valiosos arrecifes.

En conclusión, las proyecciones indican que los arrecifes de la región de la Península de Yucatán enfrentan un futuro incierto y desafiante debido al estrés por calor y la probabilidad creciente de eventos de blanqueamiento bajo diferentes escenarios de calentamiento global.

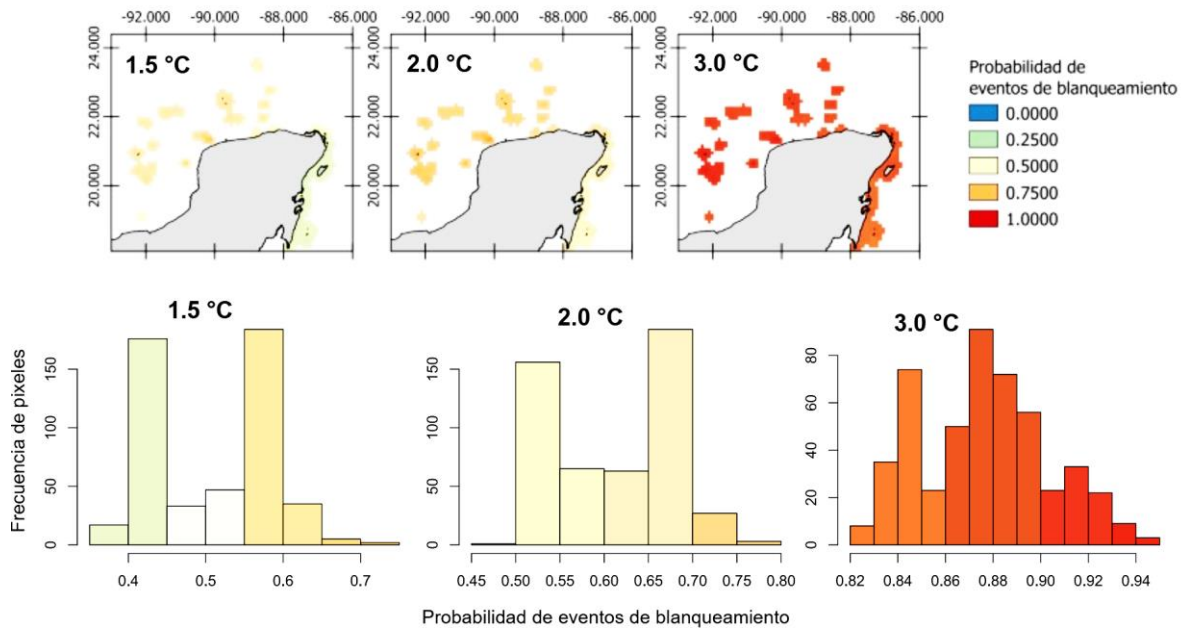


FIGURA 32. PROYECCIONES DE ESTRÉS POR CALOR Y PROBABILIDAD DE EVENTOS DE BLANQUEAMIENTO PARA LOS ARRECIFES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

V.3.2.4. Sensibilidad al blanqueamiento

La sensibilidad al blanqueamiento de coral en el Caribe es un fenómeno complejo influido por diversos factores, incluyendo la variabilidad térmica, el historial de blanqueamiento, la profundidad y la composición de especies. Estos factores interactúan y amplifican el riesgo de blanqueamiento en ciertas regiones.

V.3.2.4.1. Variabilidad térmica

La variabilidad térmica desempeña un papel crucial en la sensibilidad al blanqueamiento de coral, presentando una perspectiva dual en términos de su impacto en la salud de los corales (McClanahan, 2022). Si bien es cierto que los eventos de blanqueamiento son más probables cuando las temperaturas experimentan cambios abruptos e inusuales en un corto período (Hughes et al., 2017), también existe la noción contraria de que los corales en regiones con alta variabilidad térmica pueden desarrollar cierta resistencia debido a su adaptación a cambios bruscos en la temperatura (Chollett et al., 2014; Safaie et al., 2018). Existe una perspectiva que sugiere que los corales en regiones con alta variabilidad térmica pueden haber desarrollado una mayor capacidad de adaptación a los cambios en la temperatura del agua. En áreas donde las temperaturas fluctúan ampliamente entre las estaciones, los corales podrían

haber evolucionado mecanismos para lidiar con la variabilidad térmica (Chollett et al., 2014). Esta adaptación podría conferirle cierta resistencia al estrés térmico, ya que están acostumbrados a cambios bruscos y podrían tener sistemas fisiológicos más flexibles para enfrentar condiciones cambiantes (Scheufen et al., 2017). La relación entre la variabilidad térmica y la sensibilidad al blanqueamiento coralino en el Caribe no es lineal. Mientras que las fluctuaciones térmicas inusuales pueden inducir estrés y desencadenar eventos de blanqueamiento, los corales en regiones con alta variabilidad térmica también podrían poseer una cierta capacidad de resistencia o menor sensibilidad.

A pesar de que existe información disponible con la cual se podría generar indicadores de variabilidad térmica, en la presente consultoría se decidió no incluir este tipo de métricas debido a que no existe un consenso general acerca de su relación con la respuesta al blanqueamiento. Si en el futuro existiría un consenso este tipo de métricas podrían ser incluidas usando datos de la temperatura superficial del mar de la región.

V.3.2.4.2. Profundidad

En el Caribe, los arrecifes de coral en aguas poco profundas están expuestos a cambios rápidos en la temperatura del agua y a niveles de luz solar intensa. Estas condiciones hacen que los corales en aguas superficiales sean más vulnerables al estrés térmico y, por ende, más propensos al blanqueamiento. La exposición directa a la radiación solar y las fluctuaciones de temperatura pueden debilitar la capacidad de los corales para mantener una relación simbiótica estable con las zooxantelas, lo que aumenta la probabilidad de expulsión y blanqueamiento. Esta hipótesis es reconocida como la protección o refugio por la profundidad (Glynn, 1996), la cual puede ser un aspecto fundamental que considerar en el caso del Caribe. Sin embargo, algunas investigaciones en la región han revelado patrones más complejos. En algunas circunstancias, los corales situados en aguas de profundidad intermedia también pueden experimentar blanqueamiento, incluso más severo que sus contrapartes en aguas poco profundas (Bongaerts et al., 2010; Muñiz-Castillo y Arias-González, 2021). Esto podría deberse a factores como la modificación de las corrientes, la concentración de nutrientes y la interacción con otros factores de estrés.

Al igual que la variabilidad térmica, en el caso de la profundidad no es completamente claro su papel en la sensibilidad de los corales, además de que a nivel de toda la región no existe la suficiente información como para implementar un indicador de sensibilidad basado en la profundidad. En futuros trabajos esto podría considerarse para la implementación de la predicción de la vulnerabilidad de los corales al blanqueamiento.

V.3.2.4.3. Sensibilidad al blanqueamiento en función de la composición de especies

Además, la composición de especies desempeña un papel crucial; algunas especies son más tolerantes al calor que otras. En el Caribe, los corales masivos y ramificados a menudo son más sensibles al blanqueamiento. Los indicadores de sensibilidad considerando la respuesta histórica de las especies a los eventos de blanqueamiento, así como diversas características funcionales pueden ser excelentes representantes de la sensibilidad, siendo este el indicador más claro usado en la gran mayoría de trabajos (Swain et al., 2016; McClanahan 2022). Para cada región (Tabla 13) se calculó el porcentaje de cada una de las especies de coral y a cada especie se le asignó la severidad del blanqueamiento, basada en los cálculos de los datos de HRI desde el 2015 al 2017 del monitoreo de blanqueamiento, la cual puede ser alta, media o baja (Anexo 5).

TABLA 13. SENSIBILIDAD AL BLANQUEAMIENTO EN BASE A LA COMPOSICIÓN DE ESPECIES DE CORAL

	Banco de Campeche	Banco de Campeche en Yucatán	Banco Chinchorro	Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	Cozumel	Norte Quintana Roo	Sur Quintana Roo
BSI abso	23.653	6.147	13.937	11.283	10.473	7.070	8.010
BSI rela	0.785	0.524	0.804	0.765	0.829	0.655	0.783

La sensibilidad al blanqueamiento de coral exhibe un patrón de variación espacial que está intrínsecamente vinculado a la composición de especies de coral en distintas regiones. Entre las zonas más susceptibles, destaca de manera sobresaliente el Banco de Campeche, presentando tanto la máxima sensibilidad absoluta como relativa (Fig. 33). Esta región se caracteriza por su relativa alta cobertura coralina y la presencia de especies que muestran una predisposición al blanqueamiento. Sin embargo, al considerar la sensibilidad relativa, prácticamente todas las regiones en Quintana Roo también exhiben un alto grado de susceptibilidad (Fig. 33). Específicamente, Banco Chinchorro, el Sur de Quintana Roo y Cozumel resaltan debido a que sus composiciones de especies están dominadas por tipos de coral como *Agaricia tenuifolia*, *A. agaricites* y especies del género *Orbicella*. Estas especies han demostrado ser particularmente sensibles al blanqueamiento térmico y, por lo tanto, contribuyen a la elevada sensibilidad relativa en estas regiones. Este panorama destaca la importancia

de considerar no solo la cobertura total de coral, sino también la presencia y proporción de especies con diferentes niveles de susceptibilidad al blanqueamiento, para comprender la dinámica de la sensibilidad en los arrecifes de coral.

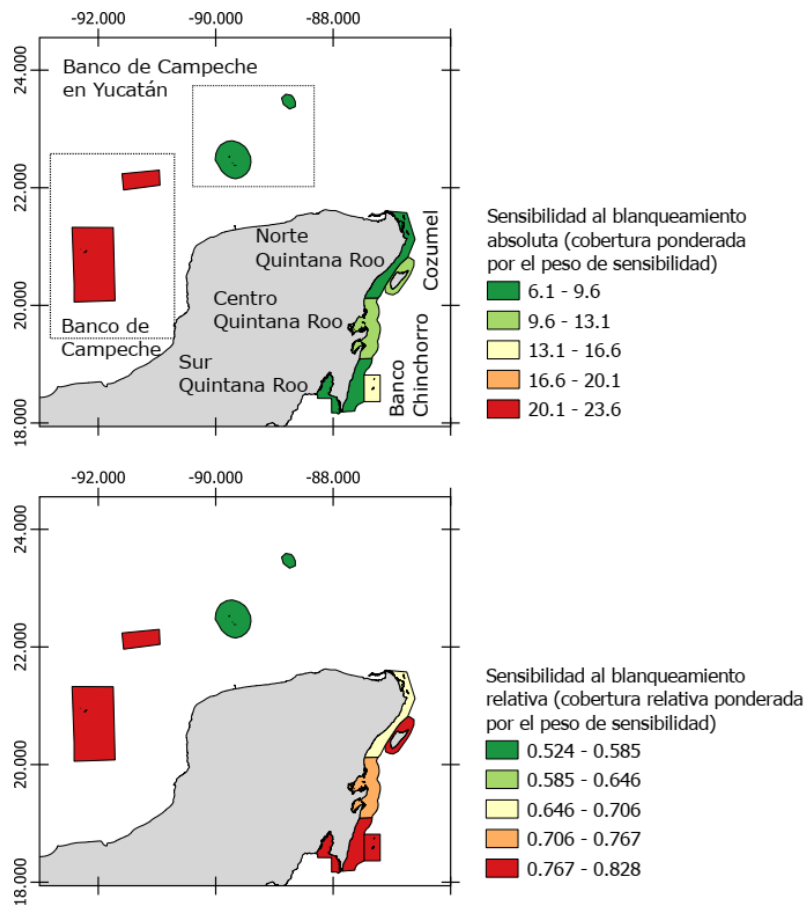


FIGURA 33. SENSIBILIDAD ESPACIAL RESPECTO AL BLANQUEAMIENTO PARA LOS ARRECIFES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

V.3.2.5. Capacidad adaptativa

Los arrecifes de coral, a pesar de su vulnerabilidad inherente al blanqueamiento y otras amenazas, han demostrado una capacidad de adaptación y resiliencia a lo largo del tiempo en algunos casos. Varios mecanismos y estrategias han sido identificados como factores que pueden ayudar a los corales a enfrentar el desafío del blanqueamiento y aumentar su supervivencia.

En el caso particular de la capacidad adaptativa al blanqueamiento, existen diversas hipótesis que podrían explicar un poco los patrones de recuperación de estos ecosistemas. De forma general, estos indicadores se relacionan con aspectos ligados a la variabilidad genética y fisiológica, la protección de los arrecifes y la exposición crónica a otros estresores.

V.3.2.5.1. *Tasa de Reclutamiento y Conectividad*

La tasa de reclutamiento de corales jóvenes y su capacidad para establecerse en áreas degradadas contribuyen significativamente a la resiliencia del arrecife. Corales jóvenes pueden ser más resistentes al estrés y pueden repoblar áreas afectadas. Además, la conectividad entre diferentes poblaciones de corales puede permitir el intercambio genético y la propagación de características adaptativas, fortaleciendo la capacidad de adaptación. En el caso de la recuperación de los arrecifes coralinos después de eventos de blanqueamiento y otras perturbaciones (McClanahan et al., 2012; Hughes et al., 2019), se ha observado que los arrecifes con alto reclutamiento tienden a ser recuperados mucho más rápido.

Para esta consultoría, se intentó recuperar información de la magnitud de la conectividad entre los arrecifes de la región. Sin embargo, a pesar de existir diferentes fuentes de información no fue posible obtener datos libres o que se compartieran para considerarlos dentro del proyecto.

V.3.2.5.2. *Áreas Naturales Protegidas*

Las ANP juegan un papel vital en la preservación de la salud de los arrecifes de coral. Al limitar la actividad humana y la explotación de recursos, las ANP proporcionan un refugio para los corales y la vida marina, permitiendo la recuperación natural de los ecosistemas afectados. La creación y el manejo adecuado de las ANP pueden aumentar la resiliencia de los arrecifes al reducir las presiones antropogénicas. De la misma manera, los arrecifes que se encuentran en mejores condiciones, aquellos que presentan medidas activas de manejo (como programas de restauración, eliminación de depredadores y control de enfermedades) y están protegidos de otros impactos, pueden permitir una mejor recuperación de los corales. El estado de gestión y conservación del arrecife a menudo puede ser un factor importante en la capacidad de los corales para recuperarse (Shaver et al., 2018; Suchley y Álvarez-Filip, 2018; Cortés-Useche et al., 2019).

V.3.3. *Huracanes*

V.3.3.1. *Descripción (exposición)*

Los huracanes son fenómenos naturales que modulan la energía de la tierra, la temporada de huracanes en la cuenca el océano atlántico ocurre de junio a noviembre y se registran en promedio de 8 huracanes al año en la región (Taylor y Alfaro, 2005). Estos fenómenos al pasar por los arrecifes pueden provocar la destrucción de colonias de coral. En el Caribe los huracanes de categorías 4 y 5 causan una disminución abrupta

en la cobertura de coral vivo, que puede variar entre un 15% y un 60% (Fig. 34; Gardner et al., 2005). A coberturas mayores a 20 se puede ver perdidas mayores de cobertura de coral en todas las categorías de huracán y a mayor categoría hay mayor pérdida (González-Barrios et al., 2023). Los huracanes afectan principalmente a los corales de formas ramificadas (Fig. 35; Bozec et al., 2015; Madin y Connolly, 2006). También, la erosión por la arena durante un huracán causa una mortalidad del 80% en toda la colonia de corales juveniles, por quedar enterrado (Mumby, 1999).

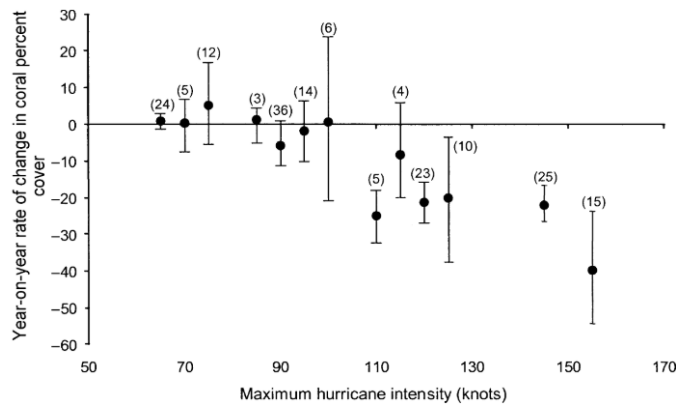


FIGURA 34. TASA DE CAMBIO A DIFERENTES INTENSIDADES DE VELOCIDAD DE VIENTO DE HURACANES

Fuente: Gardner et al, 2005



FIGURA 35. COLONIAS DE CORAL DE MORFOLOGÍA RAMOSA DE *ACROPORA PALMATA* SANAS Y ROTAS

Nota: Arrecife Limones en Puerto Morelos en el Norte de Quintana Roo, antes y después del paso de huracán Grace en 2021 categoría 1, fotos BARCOLAB.

V.3.3.2. *Patrones históricos (exposición)*

Para la Península de Yucatán en los últimos 43 años han pasado 106 tormentas, de las cuales 36 fueron categoría 1 o mayor (Fig. 36). Para el Banco de Campeche (porción

Campeche) no se han registrado eventos de alta intensidad, solamente tormentas o depresiones tropicales, por lo cual los huracanes no representan una fuerte amenaza para esta zona (Fig. 37). El Banco de Campeche (Yucatán) sólo ha tenido la presencia de tormentas y huracanes de categoría 1. En cambio, para la zona del Caribe mexicano, la parte Norte y Centro de Quintana Roo son las zonas que han recibido mayor número de estos fenómenos climatológicos, incluidos huracanes de categorías 4 y 5 (huracanes mayores). Las zonas insulares (Cozumel y Banco Chinchorro) han recibido un menor número de fenómenos meteorológicos, pero al menos han tenido el paso de un huracán mayor (Fig. 37 y 38).

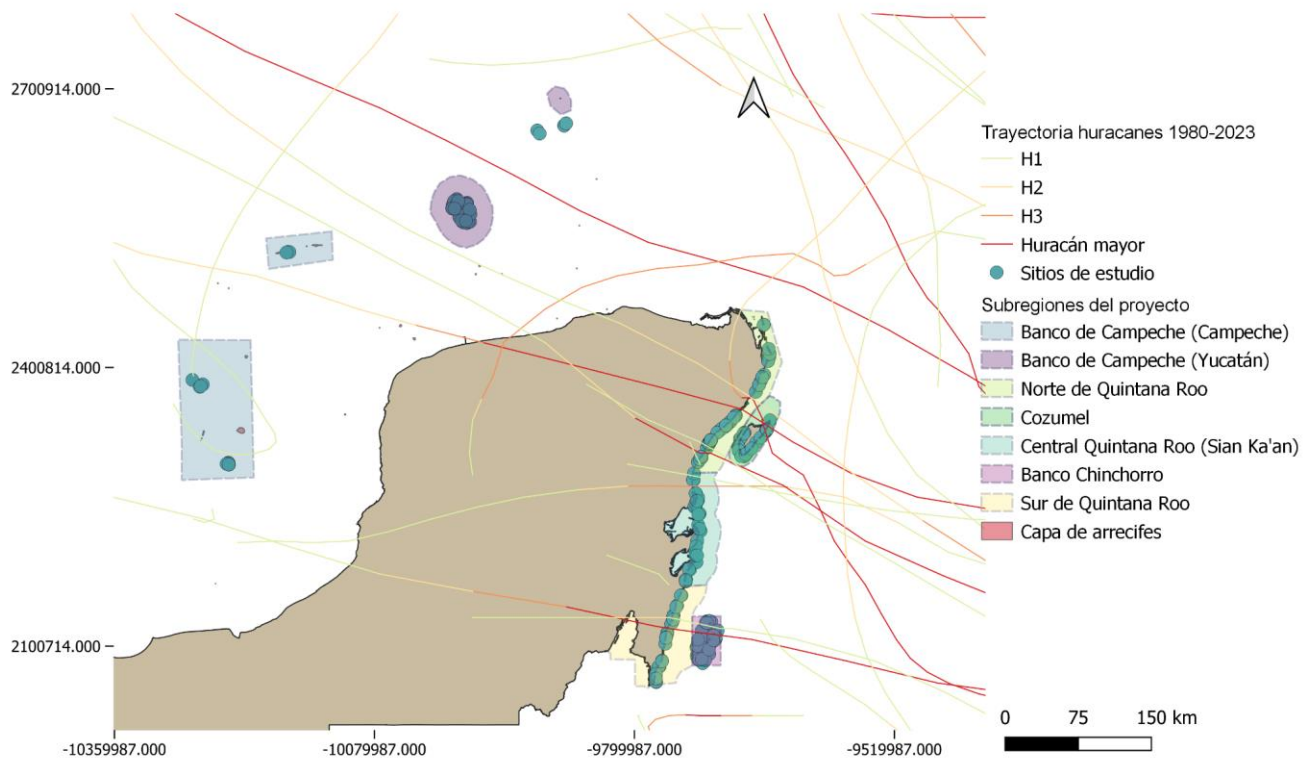


FIGURA 36. TRAYECTORIA DE LOS HURACANES QUE PASARON ENTRE 1980-2023 EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

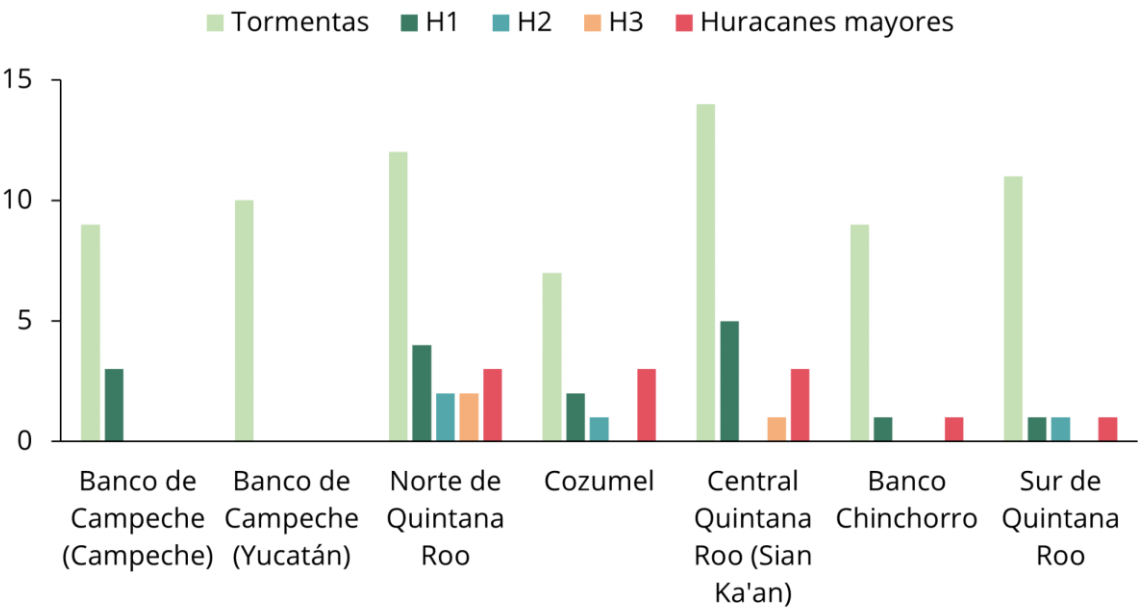


FIGURA 37. HURACANES CUYA TRAYECTORIA HA PASADO POR LA PENÍNSULA DE YUCATÁN DE 1980-2023 EN UN RANGO DE 30 KM

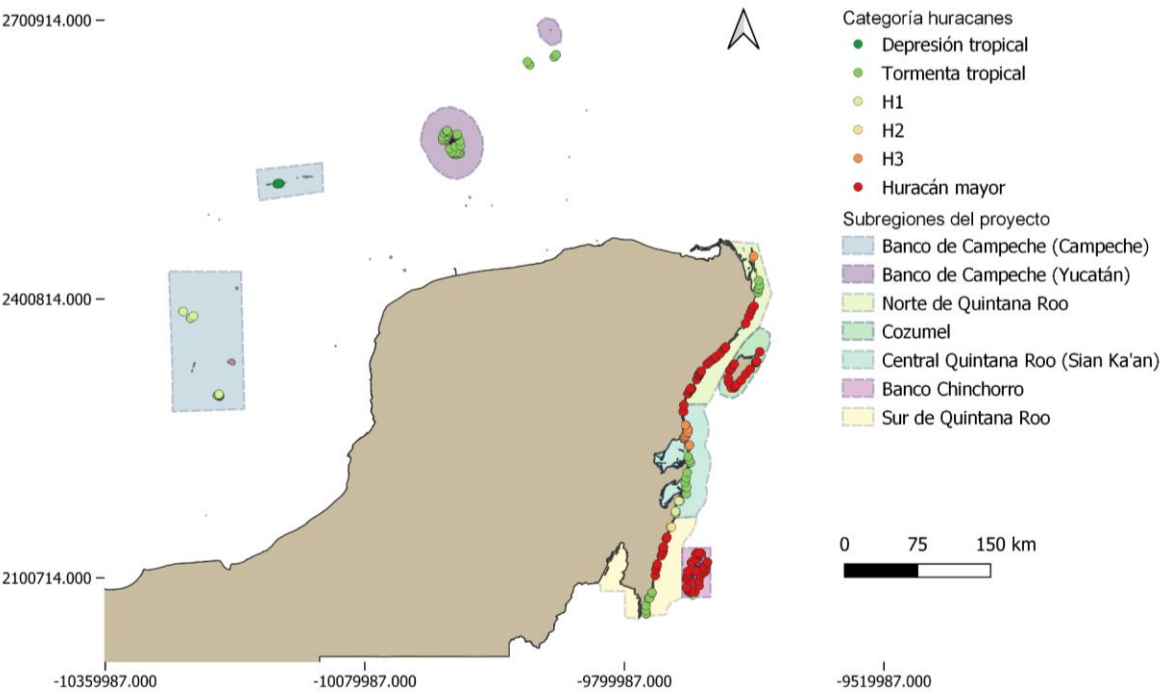


FIGURA 38. EXPOSICIÓN DE LAS SUBREGIONES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN A LAS DISTINTAS CATEGORÍAS DE HURACÁN DE 1980-2023

V.3.3.3. *Evaluación de sensibilidad de huracanes en arrecifes*

La sensibilidad de los arrecifes de coral a los huracanes se refiere a su grado de vulnerabilidad ante los impactos de estos eventos. Algunos factores que clave a considerar que causan más daño a los arrecifes, basados en el análisis de Pérez-Cervantes y colaboradores en 2020 son:

1. Porcentaje cobertura coral muestra inicial: Los arrecifes más saludables y con mayor cobertura de coral estas más relacionados con mayores pérdidas de cobertura coralina después el impacto de un huracán.
2. Grado de protección del arrecife, arrecifes situados en barlovento (área expuesta al viento y al oleaje) en los huracanes pierden mejor cobertura de coral que sitios situados en sotavento (lado protegido).
3. Máxima velocidad viento impacto con porcentaje de cobertura coral muestra inicial. La disminución de la cobertura aumenta a medida que la velocidad del viento al impacto aumenta del huracán, en todos los tipos de condiciones del arrecife y la mayor pérdida se registra en los arrecifes que cuentan con una cobertura de coral mayores a 40%.

El grado de vulnerabilidad de las especies de coral está relacionada con la morfología que están tienen (Fig. 39), comúnmente, las comunidades de corales ramificados como *Acropora palmata* suelen ser más vulnerables a los impactos de huracanes, los cuales ocasionan la ruptura y separación de las colonias de coral (Madin y Connolly, 2006; Bozec et al., 2015). Corales que crecen naturalmente en forma de ramas u hojas son más susceptibles a la ruptura. Para cada especie se identificó la morfología (Perry et al, 2019), y la densidad por zona, ya que corales de forma ramosa con menor densidad serán los más susceptibles a los huracanes. En la zona del Banco de Campeche en Yucatán existe un bajo porcentaje de especies ramosas, a diferencia del Norte de Quintana Roo dónde se observan los porcentajes más altos de estas especies, siendo esta zona más sensible al paso de los huracanes (Anexo 3).

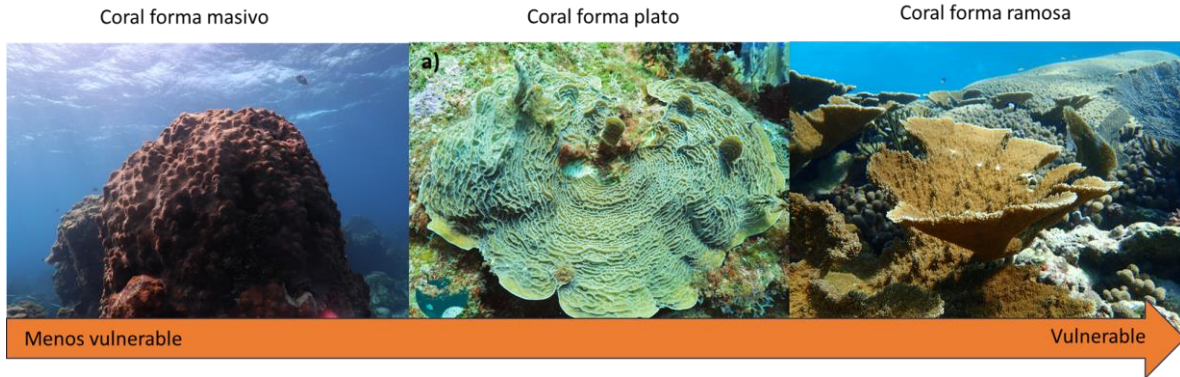


FIGURA 39. VULNERABILIDAD DE LAS DIFERENTES MORFOLOGÍAS DE CORALES A LOS HURACANES

Nota: modificado de Madden et al. 2023, fotos BARCOLAB.

La sensibilidad a los huracanes exhibe una marcada variación espacial que está estrechamente vinculada a la cobertura de coral total. La zona del Norte de Quintana Roo destaca como una de las más sensibles, tanto en términos de máxima sensibilidad absoluta como relativa, esto en su mayoría está dado por la composición de especies ramosas susceptible a romperse debido al efecto de los huracanes (Fig. 40). De igual forma toda la zona de Quintana Roo es la zona más expuesta al paso de los huracanes, las que reciben el impacto directo de la fuerza del viento. A pesar de que durante los últimos 40 años, la zona del Banco de Campeche no ha experimentado el paso de huracanes mayores, con base en este análisis, esta área destaca como una de las más sensibles, en términos de máxima sensibilidad absoluta debido a la alta cobertura de coral que existe en la zona, pero al observar la sensibilidad relativa vemos que tiene una sensibilidad baja ya que no hay una alta cobertura de especies susceptibles, lo mismo sucede con la zona de Banco Chinchorro (Fig. 40).

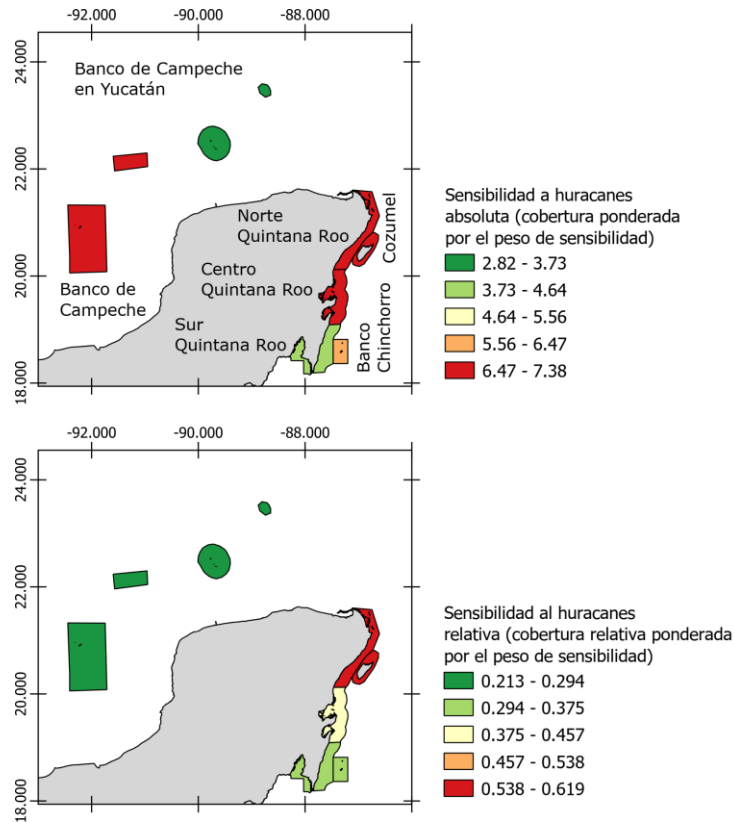


FIGURA 40. SENSIBILIDAD ESPACIAL RESPECTO A LOS HURACANES PARA LOS ARRECIFES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

V.3.3.4. Capacidad adaptativa de huracanes en arrecifes.

La capacidad adaptativa se refiere a la habilidad de los arrecifes de coral para recuperarse y adaptarse después de un impacto. Algunos aspectos por considerar incluyen la composición de especies, la regeneración natural y el monitoreo. Algunas especies de coral son más resistentes y pueden recuperarse más rápido después de un daño causado por huracanes. Gardner y colaboradores (2005) indican que el tiempo de recuperación es de 8 años después del paso de un huracán. En general, la cobertura de coral en los sitios afectados por un huracán disminuye a un ritmo significativamente más rápido que en los sitios no impactados. De igual forma la cobertura de las especies ramificadas es la que se ve mayormente afectada debido al paso de estos fenómenos naturales (Estrada-Saldívar et al., 2022)

Regeneración Natural, la capacidad de los corales para reproducirse y regenerarse es esencial para la recuperación a largo plazo. Los corales más vulnerables a la ruptura son los ramificados, los cuales son más propensos a propagarse asexualmente mediante la fragmentación, por lo que naturalmente los fragmentos pueden fijarse al sustrato (Estrada-Saldívar et al., 2022). Las tormentas incluso han sido llamadas

“eventos reproductivos mayores” para los corales que se reproducen por fragmentación, cómo *Acropora spp.*, siempre que la tormenta no sea tan severa como para matar los fragmentos resultantes (Highsmith, 1982).

Realizar un monitoreo después del paso de un huracán es importante para poder evaluar el impacto y capacidad de respuesta de los arrecifes. Para esto es necesario determinar primeramente la extensión de la pérdida de coral, la alteración de la topografía del arrecife y los cambios en la comunidad de peces y otros organismos marinos. Y en segundo lugar registrar cómo los corales se recuperan con el tiempo y si hay signos de reproducción y crecimiento saludable. Es recomendable contar con una línea base para poder realizar una comparación antes y después del paso del huracán.

V.3.3.5. *Proyecciones*

Junto con el aumento de la temperatura superficial del mar, está pronosticado el aumento y la severidad de los huracanes; se estima que incrementarán entre 1 y 10% conforme al aumento de la temperatura a nivel mundial (Knutson, 2023), lo que puede ocasionar graves daños a los ecosistemas coralinos de la región. Este nivel de afectación está relacionado con la cobertura inicial de dicho sitio, la exposición que tiene y la máxima velocidad alcanzada del huracán al momento del impacto. Un huracán mayor (categoría 4 o 5) puede causar diez veces más daño que un huracán categoría 1, por lo que disminuirá la cobertura de coral hasta en 50% (González-Barrios et al., 2023; Pérez-Cervantes et al., 2020); mientras que huracanes de menor intensidad pueden tener un efecto positivo al fragmentar distintas especies y propiciar la dispersión vegetativa de los corales constructores como *Acropora palmata* (González-Barrios et al., 2023; Nyström et al., 2000; Pérez-Cervantes et al., 2020).

V.3.4. *Densidad poblacional y demografía*

Se observaron patrones esperados en relación con la densidad poblacional (Fig. 41). Las ciudades más reconocidas, como Mérida, Cancún y Playa del Carmen, presentaron una mayor densidad poblacional. Además, otras localidades con una densidad ligeramente menor, como Puerto Morelos, Akumal, Tulum, Cozumel y Chetumal, también se destacaron en el análisis.

Estos patrones se mantuvieron consistentes tanto para el año 2000 como para el 2020 (Fig. 42). Es interesante destacar que se observó una densidad poblacional intermedia en muchos de los poblados cercanos a las carreteras. Esta distribución de densidad poblacional con relación a las vías de transporte se hizo aún más notoria a partir del año 2020.

El mayor incremento en la densidad poblacional humana se observó en las ciudades antes mencionadas (Fig. 42). Es importante resaltar que Playa del Carmen ha experimentado un incremento especialmente elevado en su densidad poblacional, pero esta tendencia también se ha observado en todas las demás ciudades mencionadas. Se ha notado tanto un aumento en la zona habitada en el año 2000 como un incremento en la extensión de áreas con una mayor densidad poblacional en los bordes o periferias de estos asentamientos urbanos.

Estos procesos de concentración poblacional y expansión urbana pueden estar relacionados con fenómenos de gentrificación, donde áreas anteriormente menos desarrolladas o rurales se transforman para adaptarse a las demandas de un crecimiento acelerado y el desarrollo turístico. A medida que estas ciudades atraen más población y se expanden, pueden surgir desafíos en términos de planificación urbana, manejo de recursos naturales y preservación de áreas sensibles, como los ecosistemas costeros y los arrecifes de coral cercanos.

El aumento en la densidad poblacional y la expansión urbana también pueden ejercer presión sobre los servicios públicos y la infraestructura, así como en la calidad de vida de los residentes locales. Por tanto, es esencial abordar estos cambios demográficos y su impacto en el entorno natural para garantizar un desarrollo sostenible y equitativo en la Península de Yucatán. La planificación y la ejecución adecuadas son fundamentales para evitar problemas de sobreexplotación de recursos, pérdida de biodiversidad y degradación ambiental, para proteger así el patrimonio natural y cultural de esta región tan valiosa.

Estos hallazgos resaltan la influencia de factores como la infraestructura, las oportunidades económicas y la accesibilidad en la distribución de la densidad poblacional en la Península de Yucatán. Los centros urbanos principales y las zonas turísticas de renombre han atraído una mayor concentración de población, mientras que los poblados cercanos a las carreteras también muestran una densidad significativa. Comprender estos patrones de densidad poblacional es importante para una planificación adecuada y el manejo sostenible de recursos en la región.

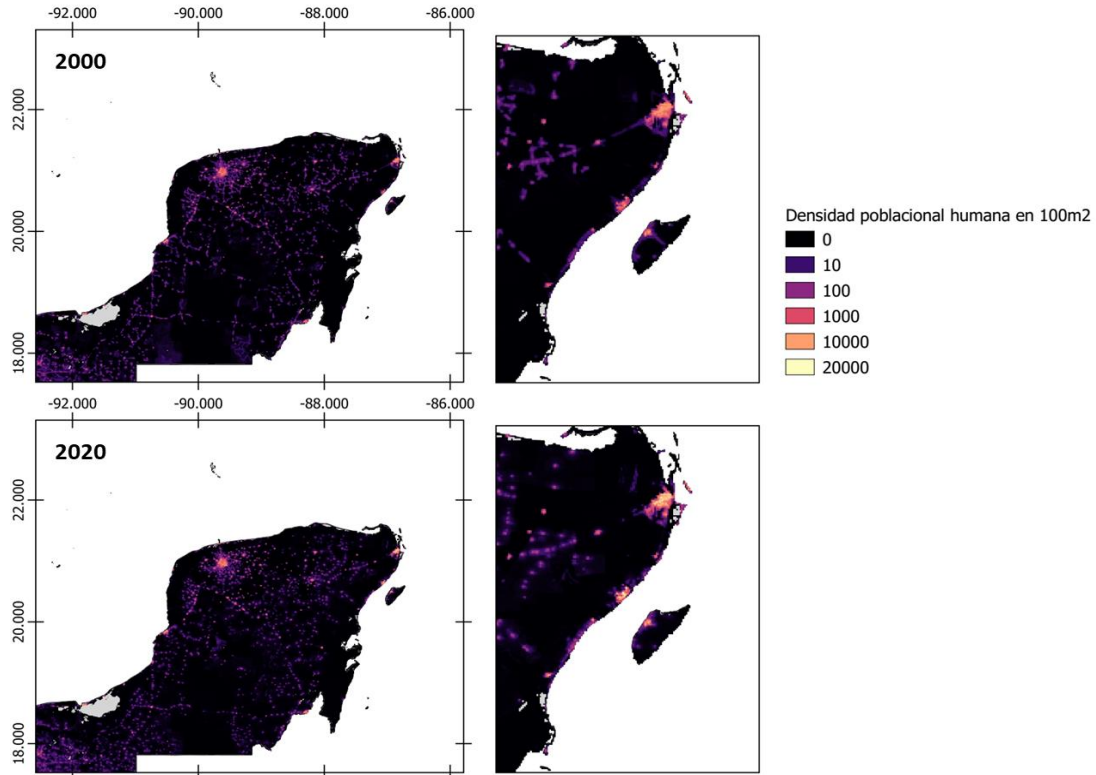


FIGURA 41. DENSIDAD POBLACIONAL HUMANA EN 100M² EN LOS AÑOS 2000 Y 2020

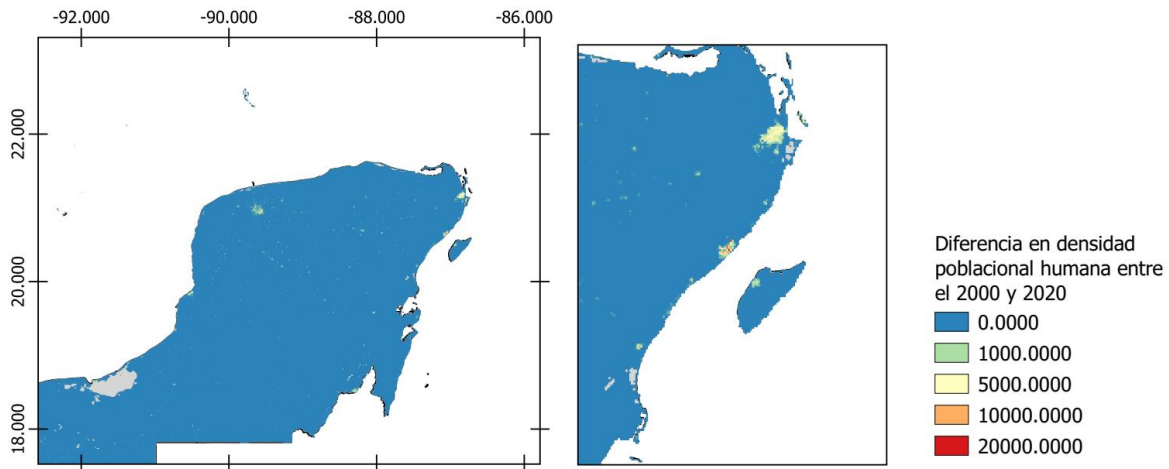


FIGURA 42. DIFERENCIA EN DENSIDAD POBLACIONAL HUMANA

Se llevó a cabo un proceso de procesamiento de datos que involucró la aplicación de un buffer de 25 km alrededor de cada región de arrecifes, con el fin de determinar la población que se beneficia de la protección proporcionada por los propios arrecifes (Tabla 14). A partir de este análisis, se identificó que la región Norte de Quintana Roo exhibe el mayor número de residentes protegidos por los arrecifes. Esta conclusión se respalda en la constatación de que esta zona cuenta con una densidad poblacional

humana significativamente más alta en las proximidades de la franja costera. Por otro lado, la zona del Banco de Campeche no cuenta con población humana protegida asociada a los arrecifes coralinos.

TABLA 14. POBLACIÓN HUMANA CERCANA A LOS ARRECIFES DE CORAL

Región de estudio de arrecifes	Población humana en 2020 a 25 km de los arrecifes
Banco Campeche	0
Banco Campeche en Yucatán	0
Norte de Quintana Roo	1,630,738
Cozumel	445,321
Central Quintana Roo (Sian Ka'an)	5,728
Banco Chinchorro	100*
Sur de Quintana Roo	279,252

Fuente: WordIPop, 2023.

Nota: Para Banco Chinchorro es el número aproximado de pescadores que habitan ahí (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5313972).

V.4. Estrésos locales y globales

Con base en la búsqueda bibliográfica realizada, se obtuvieron distintas fuentes de información a partir de las cuales se encontró que las amenazas pueden provenir de fuentes antropogénicas y naturales, que tienen un impacto importante en la salud de los ecosistemas coralinos, lo cual se puede ver reflejado en un declive en la cobertura de coral, o en el índice de diversidad asociado (Tabla 15).

TABLA 15. DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS QUE AFECTAN A LOS ARRECIFES CORALINOS

Tipo	Amenaza	Descripción	Extensión espacial
Antropogénica	Dragado (extracción de arena)	El dragado puede causar daños directos e indirectos a los arrecifes ya sea al romper los corales o sofocando a los corales mediante la suspensión de sedimentos (Jones et al., 2016).	< 1 km
Antropogénica	Encallamientos/ daño con anclas	Se refiere a encallamiento cuando una embarcación, en este caso, queda detenida, sin posibilidad de moverse, provocando grandes	< 1 km

Tipo	Amenaza	Descripción	Extensión espacial
		daños físicos en la estructura arrecifal. Otro daño asociado a embarcaciones es cuando anclan en el arrecife indebidamente (Byrnes & Dunn, 2020; Forrester et al., 2015).	
Antropogénica	Hidrocarburos	Esto incluye los derrames de petróleo los cuales pueden matar corales según la especie y el grado de exposición. El petróleo pesado puede mezclarse con arena o sedimentos suspendidos y volverse lo suficientemente denso como para hundirse debajo de la superficie donde puede asfixiar a los corales que se encuentran debajo. La toxicidad crónica del petróleo también impide la reproducción, el crecimiento, el comportamiento y el desarrollo de los corales (Turner & Renegar, 2017).	10 a 100 km
Antropogénica	Pesca	La extracción de especies claves importantes afecta la resiliencia del arrecife e impide que se lleven a cabo ciertos procesos ecológicos. De igual manera algunas prácticas pesqueras pueden dañar la estructura arrecifal u otros organismos, incluidas la pesca deportiva e industrial, y la extracción de peces de ornato y sobrepesca (Burke et al., 2011; Jackson et al., 2014; Wilkinson, 1999).	10 a 100 km
Antropogénica	Buceo	Las malas prácticas de actividades acuáticas como buceo, esnórquel, deportes acuáticos pueden ocasionar daño físico a la estructura arrecifal (Burke et al., 2011; Jackson et al., 2014; Tkachenko, 2017).	< 1 km
Antropogénica	Acuicultura	Contaminación del agua por nutrientes (Kennedy et al., 2020; Magris, 2018).	10 a 100 km
Antropogénica	Minería	Esta práctica aumenta la sedimentación en el mar de metales pesados provenientes de la minería terrestre. La minería marina puede aniquilar comunidades bentónicas (Burke et al., 2011; Fine et al., 2019; Majumdar et al., 2018; Tkachenko, 2017).	10 a 100 km
Antropogénica	Cambio de uso de suelo	El desarrollo costero, industrial y/o turístico altera la dinámica del flujo y daña físicamente a los arrecifes, aumenta la sedimentación, y disminuye la calidad del agua. Ejemplos actividades relacionadas con el desarrollo costero son la construcción de aeropuertos, la remoción para	10 a 100 km

Tipo	Amenaza	Descripción	Extensión espacial
		construcción y la construcción de marinas (Burke et al., 2011; Gil-Agudelo et al., 2020).	
Antropogénica	Descarga y mal manejo de aguas residuales	Las actividades basadas en la tierra tienen un importante aporte de nutrientes, fertilizantes, insecticidas, metales pesados y herbicidas que afectan la calidad del agua. Lo que podría causar eutrofización y también escorrentía de nutrientes por la erosión del suelo (Ban et al., 2014; Burke et al., 2011; Jackson et al., 2014; Kennedy et al., 2020).	10 a 100 km
Antropogénica	Arribazones masivos de sargazo	El aumento de nutrientes que conlleva el arribazón de sargazo, así como la anoxia causada por las mareas marrón pueden causar la mortandad de muchos organismos (Chávez et al., 2020; van Tussenbroek et al., 2017).	10 a 100 km
Natural	Enfermedades coralinas	Las enfermedades dañan el tejido vivo del coral y pueden provocar la muerte parcial o total de la colonia. Aunque las enfermedades son naturales y se encuentran comúnmente en los arrecifes de coral, algunos eventos pueden considerarse brotes, como la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro en el Caribe (Harvell et al., 2007; Precht et al., 2016). Un brote es un aumento repentino en la ocurrencia de una enfermedad dentro de un tiempo y lugar particular. Se ha atribuido un número cada vez mayor de enfermedades a fuentes terrestres de contaminación o problemas climáticos globales (Vega Thurber et al., 2014).	10 a 100 km
Natural	Blooms algales	Los blooms algales son un aumento en la densidad de macroalgas dentro de un área determinada. Pueden causar condiciones anóxicas para los corales debido a la asfixia (Burke et al., 2011; Gil-Agudelo et al., 2020)	10 a 100 km
Natural	Huracanes	Estas tormentas se forman sobre océanos tropicales cálidos, con vientos que giran alrededor de centros de baja presión. Las tormentas afectan los arrecifes de coral al generar escombros y sedimentación (Burke et al., 2011).	100 a < 1000 km

Tipo	Amenaza	Descripción	Extensión espacial
Natural	Estrés térmico	Los corales pueden estresarse por cambios de temperatura, luz o condiciones de nutrientes, entre otros, por lo cual pueden expulsar algas simbióticas que viven en sus tejidos, lo que hace que se vuelvan completamente blancos o se “blanqueen” (Hoegh-Guldberg, 1999). Los eventos de blanqueamiento son causados en gran medida por aumentos en la temperatura del agua de mar que superan el umbral de tolerancia del coral en cuestión (Hughes et al., 2018). Los corales pueden sobrevivir a eventos de blanqueamiento. Sin embargo, si el periodo de estrés es intenso o dura mucho tiempo, el coral puede morir. Esta mortalidad puede variar desde la muerte de unas pocas colonias hasta eventos de mortalidad masiva.	100 a > 1000 km
Natural	Acidificación	El aumento del pH puede comprometer el crecimiento de los corales (Ban et al., 2014; Wilkinson, 1999).	100 a > 1000 km
Natural	Aumento del nivel del mar	Según proyecciones, algunos arrecifes podrían no seguir el aumento del nivel del mar en un futuro (Ban et al., 2014; Ellis et al., 2019; Wilkinson, 1999).	100 a > 1000 km
Natural	Depredación	La alta densidad de depredadores de coral tiene un efecto devastador en los arrecifes de coral (Ban et al., 2014; Burke et al., 2011; Gil-Agudelo et al., 2020).	10 a 100 km

Fuente: Álvarez-Filip et al., 2021; González-Barrios et al., 2023; Nyström, 2006.

V.4.1. Derrames de hidrocarburos

La mayor parte de la información se obtuvo de los informes anuales de PEMEX (PEMEX, 2023a). En total se encontraron seis eventos relacionados con algún tipo de fuga o derrame de hidrocarburos al mar (Tabla 16), cinco de ellos ocurrieron en la zona de Campeche, y uno en Yucatán. Debido a que en la sonda de Campeche se encuentran las plataformas petroleras de Pemex, los arrecifes de esta zona son los más amenazados y vulnerables al derrame de hidrocarburos. La información respecto a la condición arrecifal posterior a un derrame muchas veces no es posible medirla debido a que no se cuenta con una línea base de la condición de los arrecifes previa al derrame, y en otras ocasiones los trabajos realizados son protegidos y no son de uso público.

TABLA 16. INCIDENTES RELACIONADOS AL DERRAME DE HIDROCARBUROS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Estado	Mes	Año	Suceso	Lugar	Fuente
Campeche	jun	1979	Explosión plataforma	Estación Ixtoc1	(Jernelöv & Lindén, 1981)
Campeche	oct	2007	Colisión de dos plataformas	Pozo Kab101	(PEMEX, 2007)
Campeche	abr	2010	Explosión plataforma	Estación Deepwater Horizon	(Zavala-Hidalgo et al., 2012)
Campeche	jul	2021	Pérdida de contención Gasoducto I-256	Pozo KU-C	(PEMEX, 2021)
Yucatán	ene	2023	Derrame hidrocarburo	Puerto de abrigo de Yucalpetén	(SEMAR, 2023)
Campeche	jul	2023	Explosión plataforma Fuga en los ductos	Plataforma Nohoch-Alfa Campos Ek Balam	(Campuzano, 2023) (PEMEX, 2023b)

V.4.2. Encallamientos

Estos sucesos hacen referencia a los varamientos accidentales de barcos en los arrecifes de coral, que causan daños físicos a los arrecifes y por lo general la extensión del daño es local (Byrnes and Dunn, 2020). En contraste, la severidad del daño puede variar de acuerdo con el estado previo al suceso de los arrecifes, por ejemplo, arrecifes con una cobertura mayor al 20%, pueden presentar una pérdida anual de cobertura del 20% (González-Barrios et al., 2023). En la Península de Yucatán estos accidentes son recurrentes en zonas someras y entre las principales causas se encuentran las condiciones climatológicas adversas, imprecisiones de las cartas de navegación, falta de señalización, fallas en la embarcación y/o negligencia por parte de la tripulación. Especialmente en la zona de Yucatán, este tipo de accidentes son sumamente recurrentes (Tabla 17), pudiendo tener hasta dos por año. De igual forma el Norte de Quintana Roo también ha presentado numerosos casos. Es importante señalar que dado que la zona del Banco de Campeche no se encuentra bajo algún tipo de protección el registro de estos eventos puede no encontrarse sistematizado debidamente, y en

estos casos es la SEMAR quien se encarga de inspeccionar la situación. Para el caso de las ANP, la PROFEPA es la encargada de sancionar estas acciones, pero en algunas ocasiones los dueños de las embarcaciones se dan a la fuga por lo cual no existe alguna remuneración para poder subsanar el daño ocasionado. Cabe señalar que el listado aquí presentado puede estar subestimado, ya que muchas veces los reportes no son hechos o son de carácter privado.

TABLA 17. LISTADO DE ENCALLAMIENTOS OCURRIDOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Embarcación	Zona	Sitio	Año	Daño (m²)	Fuente
Orcas	Banco de Campeche	Arrecife Triángulos	2016		(Yucatán, 2016)
Maurice Ewing	Banco de Campeche en Yucatán	Bajos de Madagascar	2005		(PROFEPA, 2012)
Karla	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2007		(PROFEPA, 2012)
Karla	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2012		(PROFEPA, 2012)
Tabasco 406	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2012		(PROFEPA, 2012)
Dreamcatcher	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2013	50	(Cabrera, 2013)
Tío Loncho	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2014		(PROFEPA, 2014)
PESCAMEX XIV	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2015	250	(PROFEPA, 2015b)
Empacador VI	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2015	520	(PROFEPA, 2015a)
Kay kay	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2017		(PROFEPA, 2017a)
Lipari	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2017	73	(PROFEPA, 2017b)

Embarcación	Zona	Sitio	Año	Daño (m²)	Fuente
Tisbea	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2018		(PROFEPA, 2018b)
Fallito	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2018	40	(PROFEPA, 2018a)
Sultáb	Banco de Campeche en Yucatán	Alacranes	2019		(Rodríguez, 2019)
Grande Senegal	Banco de Campeche en Yucatán	Madagascar	2023	4000	(Ruvacaba, 2023)
Leeward	Norte de Quintana Roo	Isla Mujeres	1997		(López, 2020)
Discovery	Norte de Quintana Roo	Cancún	2007	1200	(PROFEPA, 2012; Varillas, 2007)
Cembay	Norte de Quintana Roo	Cancún	2008	2217	(WRadio, 2008)
Malucat	Norte de Quintana Roo	Puerto Morelos (Jardines)	2014	700	(Universal, 2014)
Emily Elizabeth	Norte de Quintana Roo	Punta Nizuc	2015	191	(PROFEPA, 2015c)
Lady Pris	Norte de Quintana Roo	Puerto Morelos (Tanchacté)	2016	213	(Varillas, 2016)
Pagassus	Norte de Quintana Roo	Isla Contoy	2020		(López, 2020)
Melody	Norte de Quintana Roo	Puerto Morelos	2023		(Varillas, 2023)
Velero	Norte de Quintana Roo	Puerto Venturas	2023		(AgenciaSIM, 2023)
Turquoise	Cozumel		1998		(PROFEPA, 2012)
	Centro de Quintana Roo	Cayo Culebra	2023		(Agencias, 2023)
Cozumel II	Banco Chinchorro		2005		(Martoccia, 2007)
Cozumel II	Banco Chinchorro	Cayo Lobos	2007	2000	(Martoccia, 2007)

Embarcación	Zona	Sitio	Año	Daño (m ²)	Fuente
Amazing Grace Ventura	Banco Chinchorro			60	(PROFEPA, 2018c)

V.4.3. Levantamiento de campo

Respecto a las solicitudes enviadas tanto por correo electrónico, como por medio del INAI, el 5 de julio del presente año se recibió respuesta de las siguientes ANP: RB Tiburón Ballena, APFF Yum Balam, PN Arrecife Alacranes y RB Ría Lagartos (Tabla 18). Mientras que el 31 de julio se recibió respuesta de la solicitud del INAI (Tabla 19).

TABLA 18. INFORMACIÓN RECIBIDA POR PARTE DE LA CONANP POR MEDIO DE CORREO ELECTRÓNICO

ANP	RB Tiburón Ballena	APFF Yum Balam	PN Arrecife Alacranes	RB Ría Lagartos
No. de visitantes por año (o número de brazaletes)	15,000	25,000	7,265	56,266
No. de operadores turísticos	49	36	2	45
No. de permisos para restauración	0	0	1	N/A
No. de miembros de brigadas para restaurar	0	0	1	N/A
No. de embarcaciones turísticas autorizadas	146	231	2	50
No. de embarcaciones pesqueras autorizadas	371	371	0	N/A
No. de pescadores autorizados	610	610	0	N/A
No. Frecuencia de ocurrencia de derrames de hidrocarburos	0	0	1	N/A

TABLA 19. INFORMACIÓN RECIBIDA POR PARTE DE LA CONANP A TRAVÉS DEL INAI

ANP	Número de operadores turísticos	Número de pescadores autorizados
PN Arrecife Alacranes	2	Sin información
PN Arrecife de Puerto Morelos	81	1
PN Arrecifes de Cozumel	134	Sin información
RB Arrecifes de Sian Ka'an	1	Sin información
PN Arrecifes de Xcalak	3	Sin información
RB Banco Chinchorro	7	Sin información
RB Caribe Mexicano	324	Sin información
PN Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	97	Sin información
PN Isla Contoy	12	5
APFF La porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel	26	3
APFF Manglares de Nichupté	Sin información	Sin información
RB Ría Celestún	81	Sin información
RB Ría Lagartos	43	Sin información
RB Sian Ka'an	37	Sin información
RB Tiburón Ballena	49	Sin información
PN Tulum	N/A	Sin información
APFF Uaymil	N/A/	Sin información
APFF Yum Balam	41	Sin información

V.5. Evaluación de la vulnerabilidad y de la relación de causalidad para cada factor de vulnerabilidad o amenaza identificado en los ecosistemas de arrecife de coral

A partir de la recapitulación de las mayores amenazas que han afecto la estructura física de los arrecifes (González-Barrios et al., 2023), se observó que las mayores amenazas que han sufrido los arrecifes de la Península de Yucatán en los últimos 40 años son las enfermedades de coral, eventos de blanqueamiento y huracanes. Debido a que para el Banco de Campeche no se cuenta con sitios que tengan serie de tiempo, no es posible realizar un análisis sobre como estas amenazas han afectado la cobertura de coral, pero en la tabla 20 se enlistan las mayores amenazas que han afectado estos arrecifes desde 1980. En cambio, para el Caribe mexicano se realizó el análisis en el tiempo respecto a las amenazas ocurridas. Entre 2005 y 2023 los arrecifes de esta zona han tenido el impacto de 3 huracanes mayores, dos en 2005 y uno en 2007. En 2005 fueron dos huracanes mayores los que impactaron estos arrecifes, y se puede observar como la cobertura presenta un declive después de estos sucesos, aunque también los corales se vieron afectados por el evento de blanqueamiento de ese mismo año (Fig. 43). En 2012, un huracán de categoría 2 impactos las costas de Quintana Roo, y también se observar un declive en la cobertura. Después de 2012 se puede observar como la cobertura coralina incrementa, a pesar de los dos eventos de blanqueamiento ocurridos en 2015 y 2016. Desafortunadamente en 2018 se registra el SCTLD, el cual causa un enorme impacto en la cobertura de coral (Fig. 43). Después de este evento, la cobertura coralina no tiene oportunidad de recuperarse, debido a que, en los siguientes años, los arrecifes de Quintana Roo experimentaron 3 eventos de blanqueamiento (2018, 2020, y 2021), y el pasó de 4 huracanes menores (3 de estos fenómenos ocurrieron en 2020 y 1 en 2021). Al observar la tendencia de la cobertura coralina, no se observa alguna recuperación entre 2018-2022, por el contrario, el declive continua (Fig. 43).

TABLA 20. AMENAZAS QUE HAN AFECTADO LA SALUD ARRECIFAL DEL BANCO DE CAMPECHE

Subregión	Año	Suceso
Banco Campeche	1979	Derrame hidrocarburos
Banco Campeche	1988	Tormenta
Banco Campeche	1989	Tormenta
Banco Campeche	1993	Huracán categoría 1 (n=1)
Banco Campeche	1995	Huracán categoría 1 (n=2)
Banco Campeche	1996	Tormenta
Banco Campeche	2005	Tormenta y evento de blanqueamiento de alta intensidad

Subregión	Año	Suceso
Banco Campeche	2007	Derrame hidrocarburos
Banco Campeche	2010	Tormenta y derrame de hidrocarburos
Banco Campeche	2015	Evento de blanqueamiento de alta intensidad
Banco Campeche	2016	Evento de blanqueamiento de alta intensidad Encallamiento
Banco Campeche	2017	Tormenta
Banco Campeche	2018	Evento de blanqueamiento de mediana intensidad
Banco Campeche	2019	Tormenta
Banco Campeche	2020	Evento de blanqueamiento de baja intensidad
Banco Campeche	2021	Tormenta y derrame de hidrocarburos
Banco Campeche	2023	Derrame hidrocarburos
Banco Campeche (Yucatán)	1988	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	1989	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	1996	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	1997	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	1998	Evento de blanqueamiento de alta intensidad
Banco Campeche (Yucatán)	2002	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	2004	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	2005	Evento de blanqueamiento de alta intensidad
Banco Campeche (Yucatán)	2008	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	2011	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	2013	Tormenta Encallamiento
Banco Campeche (Yucatán)	2015	Evento de blanqueamiento de alta intensidad Encallamientos
Banco Campeche (Yucatán)	2016	Evento de blanqueamiento de alta intensidad
Banco Campeche (Yucatán)	2017	Evento de blanqueamiento de alta intensidad Encallamientos
Banco Campeche (Yucatán)	2018	Evento de blanqueamiento de mediana intensidad Encallamientos
Banco Campeche (Yucatán)	2019	Encallamiento
Banco Campeche (Yucatán)	2020	Evento de blanqueamiento de baja intensidad
Banco Campeche (Yucatán)	2021	Evento de blanqueamiento de baja intensidad
Banco Campeche (Yucatán)	2020	Tormenta
Banco Campeche (Yucatán)	2023	Derrame hidrocarburos

Subregión	Año	Suceso
Banco Campeche (Yucatán)	2023	Encallamiento

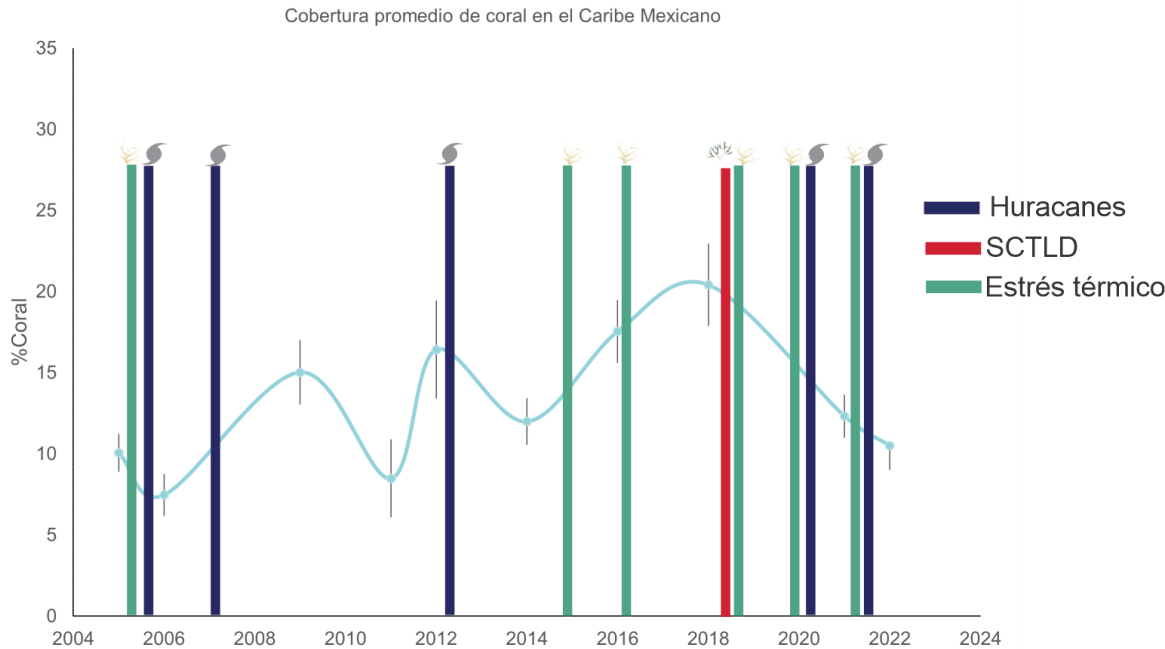


FIGURA 43. AMENAZAS QUE HAN AFECTADO LA SALUD ARRECIFAL DEL CARIBE MEXICANO

Para los sitios con series de tiempo se calculó la tasa de cambio respecto a la cobertura de coral para datos de 2005 a 2022 (Tabla 21), para cada par de datos se obtuvo el DHW del año del antes y si pasó un huracán a 30 kilómetros se describe el tipo de huracán y la velocidad del viento a la que se encontraba. De estos, 26 grupos de datos tuvieron tasas negativas, 11 después del paso de un huracán y ningún grupo de datos registró estrés térmico mayor a 4 DHW.

Se graficó la tasa de cambio de cobertura de coral después del paso de un huracán para observar la distribución de los datos y se observó que en las depresiones tropicales hay aumento de la tasa de cambio, lo que indica un aumento de la cobertura de coral, a diferencia en las tormentas tropicales dónde se observa la disminución en la tasa de cambio de las coberturas. En esa gráfica hay que considerar que para el caso de los huracanes mayores se observa un aumento de la tasa de cambio, pero son pocos datos que no podrían estar representando correctamente lo que ocurre después del paso de un huracán mayor. Otro factor por considerar es que los grupos de datos fueron dentro del periodo de 4 y 17 años donde el efecto ya no es observado (Fig. 44).

TABLA 21. TASA DE CAMBIO EN LA COBERTURA DE CORAL

Sitios	Código grupo datos	Cobertura de coral antes	Cobertura de coral después	Año antes	Año después	Número de años	Cambio en la cobertura	DHW	Huracán	Velocidad del viento (kt)
CHAN01	1a	15	7.33	2016	2021	5	-1.53	1.92		
CHI01	2a	21.17	15.67	2018	2021	3	-1.83	0		
CHI02	3a	16.33	5.83	2018	2021	3	-3.5	0	Subtropical	30
CHI04	4a	13	14.17	2018	2021	3	0.39	0	Subtropical	30
CHI05	5a	30.67	16.83	2018	2021	3	-4.61	0		
COCO02	6a	21	32.17	2016	2021	5	2.23	2.25		
CUEV18	7a	23.67	14.83	2018	2021	3	-2.95	0		
MAH01	10a	10.67	8.5	2016	2018	2	-1.09	1.45		
MAH01	11a	8.5	9.67	2018	2021	3	0.39	0.15		
MAH01	8a	11.17	9.5	2012	2014	2	-0.84	0	H1	85
MAH01	9a	9.5	10.67	2014	2016	2	0.59	0.46	Depresión tropical	20
MAH034	12a	16.83	6.83	2016	2021	5	-2	1.49		
MX1006	13a	13.82	17.17	2005	2021	16	0.21	3.68	Tormenta tropical	36
MX1008	14a	22.5	23.17	2005	2012	7	0.1	3.53	H4	115
MX1008	15a	23.17	29	2012	2014	2	2.92	0		
MX1008	16a	29	27	2014	2016	2	-1	0.46		
MX1014	17a	8.93	10.67	2005	2021	16	0.11	2.59	H4	117
MX1017	18a	9.88	14.8	2005	2009	4	1.23	2.33		
MX1017	19a	14.8	15.17	2009	2011	2	0.19	0.44		
MX1017	20a	15.17	13.83	2011	2014	3	-0.45	1.3	Tormenta tropical	45
MX1017	21a	13.83	17.17	2014	2016	2	1.67	1.45		
MX1017	22a	17.17	10.33	2016	2021	5	-1.37	2.01		
MX1020	23a	3.2	13.17	2006	2012	6	1.66	0.44		
MX1020	24a	13.17	14.83	2012	2014	2	0.83	0	H1	85

Sitios	Código grupo datos	Cobertura de coral antes	Cobertura de coral después	Año antes	Año después	Número de años	Cambio en la cobertura	DHW	Huracán	Velocidad del viento (kt)
MX1020	25a	14.83	19.83	2014	2016	2	2.5	0.46	Depresión tropical	20
MX1042	26a	7.78	25	2005	2012	7	2.46	3.87	H4	117
MX1042	27a	25	4.5	2012	2014	2	-10.25	0		
MX1042	28a	4.5	9	2014	2016	2	2.25	0.76		
MX1043	29a	6.42	21.35	2005	2009	4	3.73	3.76	H4	117
MX1043	30a	21.35	14.83	2009	2011	2	-3.26	1.34		
MX1043	31a	14.83	7	2011	2014	3	-2.61	1.69	Tormenta tropical	57
MX1043	32a	7	21.5	2014	2016	2	7.25	1.26		
MX1043	33a	21.5	11.83	2016	2021	5	-1.93	2.5		
MX1048	34a	9.77	9	2009	2011	2	-0.39	0.91		
MX1048	35a	9	13.83	2011	2014	3	1.61	1.64	Tormenta tropical	57
MX1048	36a	13.83	14.67	2014	2016	2	0.42	0.99		
MX1048	37a	14.67	15	2016	2021	5	0.07	2.23		
MX1050	38a	4.83	9.67	2005	2012	7	0.69	2.4		
MX1050	39a	9.67	11.2	2012	2014	2	0.77	0		
MX1050	40a	11.2	14.67	2014	2016	2	1.74	1.28		
MX1050	41a	14.67	6.29	2016	2021	5	-1.68	2.37		
MX1053	42a	10.15	11.32	2005	2009	4	0.29	2.07	H4	130
MX1053	43a	11.32	2.83	2009	2011	2	-4.25	0.45		
MX1053	44a	2.83	6.17	2011	2014	3	1.11	1.29	Tormenta tropical	55
MX1053	45a	6.17	4.5	2014	2016	2	-0.84	0.69		
MX1053	46a	4.5	4.17	2016	2021	5	-0.07	1.88		
MX1055	47a	5.62	6.67	2005	2012	7	0.15	2.08	H4	115
MX1055	48a	6.67	6.5	2012	2014	2	-0.09	0		

Sitios	Código grupo datos	Cobertura de coral antes	Cobertura de coral después	Año antes	Año después	Número de años	Cambio en la cobertura	DHW	Huracán	Velocidad del viento (kt)
MX1055	49a	6.5	11.5	2014	2016	2	2.5	1.14		
MX1057	50a	1.5	11	2005	2012	7	1.36	1.75	H4	130
MX1057	51a	11	11.5	2012	2014	2	0.25	0		
MX1057	52a	11.5	5.17	2014	2016	2	-3.17	1.72		
MX1057	53a	5.17	5.67	2016	2021	5	0.1	1.72		
MX1059	54a	9.3	16.5	2006	2014	8	0.9	1.22		
MX1059	55a	16.5	12.67	2014	2021	7	-0.55	0.89	Depresión tropical	20
MX1065	56a	7.67	17.74	2006	2009	3	3.36	0.6		
MX1065	57a	17.74	4.33	2009	2012	3	-4.47	1.93		
MX1065	58a	4.33	14.5	2012	2014	2	5.09	0.29		
MX1065	59a	14.5	15.83	2014	2016	2	0.67	0.82	Depresión tropical	20
MX1065	60a	15.83	8.5	2016	2021	5	-1.47	2.25		
MX1075	61a	8.67	10.83	2006	2018	12	0.18	2.35		
MX1116	62a	5.75	10.17	2005	2012	7	0.63	2.08		
MX1116	63a	10.17	2	2012	2014	2	-4.09	0		
MX1116	64a	2	0.83	2014	2016	2	-0.59	1.14		
MX1117	65a	9.77	27.2	2005	2009	4	4.36	3.43	H4	117
MX1117	66a	27.2	2.67	2009	2011	2	-12.27	0.75		
MX1117	67a	2.67	7.17	2011	2014	3	1.5	1.54	Tormenta tropical	57
MX1117	68a	7.17	21.17	2014	2016	2	7	1.09		
MX1117	69a	21.17	4	2016	2021	5	-3.43	2.04		
MX1125	70a	5.96	4.33	2005	2021	16	-0.1	2.4	H4	117
MX1126	71a	6.45	12	2005	2022	17	0.33	2.4	H4	130
MX1131	72a	14.4	27.83	2005	2014	9	1.49	2.18	H4	120
MX1131	73a	27.83	37.33	2014	2016	2	4.75	2.47		

Sitios	Código grupo datos	Cobertura de coral antes	Cobertura de coral después	Año antes	Año después	Número de años	Cambio en la cobertura	DHW	Huracán	Velocidad del viento (kt)
MX1131	74a	37.33	13.67	2016	2021	5	-4.73	2.12		
MX1132	75a	21.2	16.97	2005	2009	4	-1.06	2.51	H4	120
MX1132	76a	16.97	46	2009	2012	3	9.68	0.44		
MX1132	77a	46	17.83	2012	2014	2	-14.09	0		
MX1132	78a	17.83	46.5	2014	2016	2	14.34	2.34		
MX1132	79a	46.5	31.88	2016	2021	5	-2.92	2.26		
MX1133	80a	1.35	3.4	2005	2009	4	0.51	2.48		
MX1133	81a	3.4	0.67	2009	2011	2	-1.37	0.29		
MX1133	82a	0.67	3	2011	2014	3	0.78	1.29		
MX1133	83a	3	2	2014	2016	2	-0.5	1.63		
MX1136	84a	3.12	10.05	2006	2009	3	2.31	0.76		
MX1136	85a	10.05	14.67	2009	2014	5	0.92	2.26		
MX1136	86a	14.67	12.17	2014	2016	2	-1.25	0.84	Depresión tropical	20
MX1139	87a	4.87	6.67	2006	2021	15	0.12	0.6		
MX2007	88a	14.55	19.33	2005	2021	16	0.3	3.68	Tormenta tropical	36
MX2009	89a	8.5	32.33	2005	2018	13	1.83	3.76	H4	122
MX2052	90a	19.6	12.17	2005	2021	16	-0.46	2.59	H4	117
MX2067	91a	7.22	20.3	2006	2009	3	4.36	0.6		
MX2067	92a	20.3	14.5	2009	2012	3	-1.93	1.93		
MX2067	93a	14.5	9.5	2012	2014	2	-2.5	0		
MX2067	94a	9.5	23.83	2014	2016	2	7.17	0	Depresión tropical	20
MX2067	95a	23.83	14.33	2016	2021	5	-1.9	0		
MX2078	96a	12.52	13.67	2006	2018	12	0.1	2.86		
MX2080	97a	9.42	18.83	2006	2018	12	0.78	2.73		
MX2080	98a	18.83	19.83	2018	2021	3	0.33	0		

Sitios	Código grupo datos	Cobertura de coral antes	Cobertura de coral después	Año antes	Año después	Número de años	Cambio en la cobertura	DHW	Huracán	Velocidad del viento (kt)
MX3009	100a	12.3	14.17	2009	2011	2	0.94	1.87		
MX3009	101a	14.17	16.5	2011	2014	3	0.78	2.77	Tormenta tropical	57
MX3009	102a	16.5	18.83	2014	2016	2	1.17	1.33		
MX3009	103a	18.83	15.17	2016	2021	5	-0.73	2.26		
MX3009	99a	13.4	12.3	2005	2009	4	-0.28	3.76	H4	117
MX3021	104a	0.8	0.17	2006	2014	8	-0.08	0.45		
MX3021	105a	0.17	3.33	2014	2021	7	0.45	0		
MX3054	106a	12.17	15	2005	2018	13	0.22	2.4	H4	130
MX3054	107a	15	9	2018	2022	4	-1.5	0		
MX3082	108a	15.25	43	2006	2018	12	2.31	1.71		
MX3082	109a	43	40.67	2018	2021	3	-0.78	0	Subtropical	30
MX4160	110a	6.77	16.17	2005	2018	13	0.72	2.92	H4	128
MXXCK01	111a	17.33	15.5	2012	2014	2	-0.91	0.47		
MXXCK01	112a	15.5	23.17	2014	2016	2	3.84	0.89	Depresión tropical	20
MXXCK01	113a	23.17	18.83	2016	2021	5	-0.87	3.62		
MXXCK02	114a	21.17	14.5	2012	2014	2	-3.34	0.47		
MXXCK02	115a	14.5	21.33	2014	2016	2	3.42	0.89	Depresión tropical	20
MXXCK02	116a	21.33	16.33	2016	2021	5	-1	3.62		
PAR01	117a	14.2	8	2016	2021	5	-1.24	1.88		
TACU01	118a	27.67	22.5	2016	2018	2	-2.59	2.5		
TACU01	119a	22.5	1.33	2018	2021	3	-7.06	0		

Nota: El color rojo indica mayor pérdida de cobertura de coral.

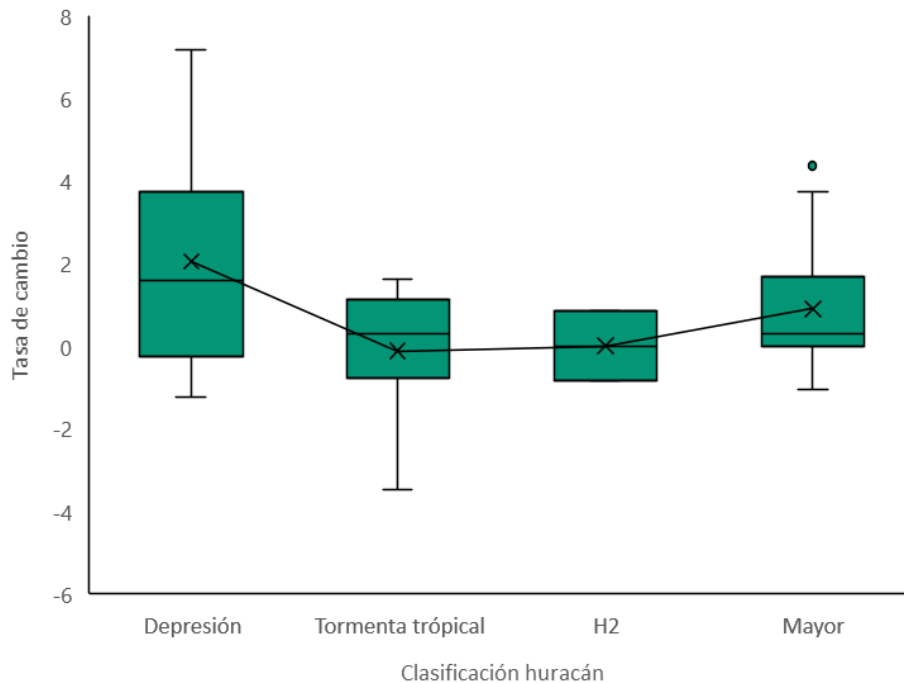


FIGURA 44. TASA DE CAMBIO DE COBERTURA DE CORAL DESPUÉS DEL PASO DE UN HURACÁN

V.6. Descripción de las principales amenazas percibidas por la población local, y recomendaciones para la implementación de estrategias para su prevención y mitigación

La encuesta —descrita en el apartado IV.4 de este documento— fue respondida por 50 personas. La mayoría de las personas encuestadas respondieron que concentran sus esfuerzos de trabajo en los arrecifes de Quintana Roo, seguido de Yucatán y en último lugar Campeche (Fig. 45). El 40% de los que respondieron la encuesta tenían entre 31 y 40 años, seguidos del grupo de 41 a 50 años (Fig. 46) Esto principalmente se debe a la cercanía entre los arrecifes de Quintana Roo y la costa, en comparación con Campeche, lo que también significa que trabajar en esta zona es menos costoso. Más del 50% de los encuestados han trabajado en los arrecifes coralinos de la Península de Yucatán más de 10 años (Fig. 47), mientras que el restante 40% ha trabajado entre 1 y 10 años. Algo que destacar es que la mayoría de los entrevistados tienen una percepción del estado de salud arrecifal mala o regular, mientras que nadie opinó que el estado de salud fuera excelente y sólo 2% opinaron que era bueno (Fig. 48). La mayoría de los encuestados conoce el estado de salud de los arrecifes puesto que los han visitado o se han enterado por medio de reportes o revistas.

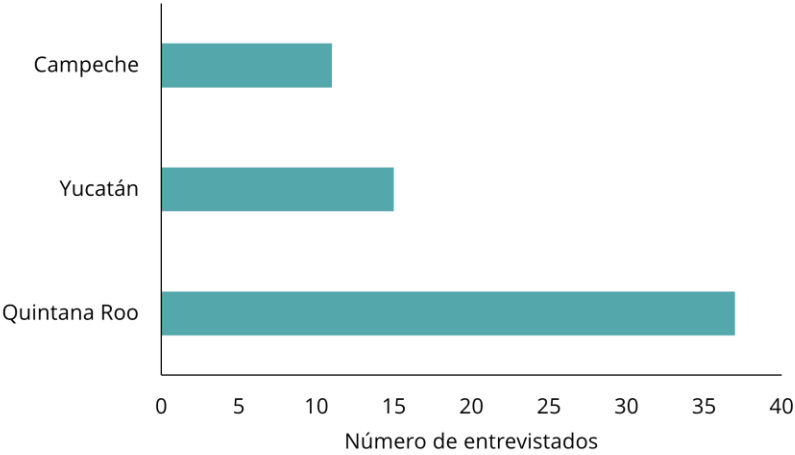


FIGURA 45. ESTADO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN QUE ABARCA EL ÁREA DE ESTUDIO DE LOS DE ENCUESTADOS

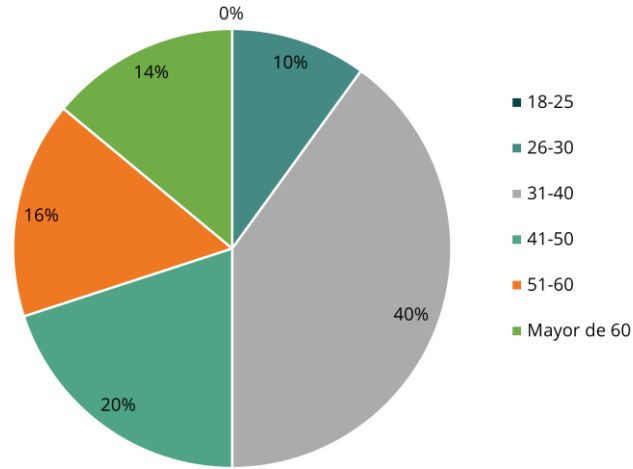


FIGURA 46. RANGO DE EDAD QUE TIENEN LOS ENTREVISTADOS

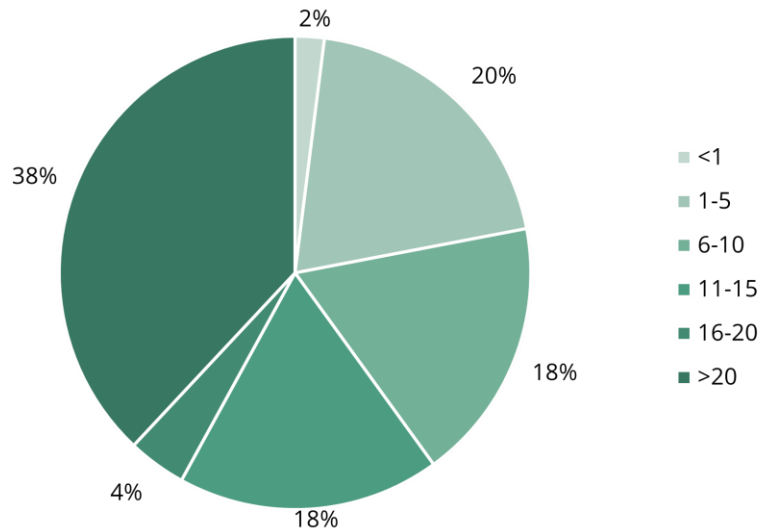


FIGURA 47. RANGO DE AÑOS DURANTE LOS CUALES LOS ENTREVISTADOS HAN TRABAJADO EN LOS ECOSISTEMAS ARRECIFALES

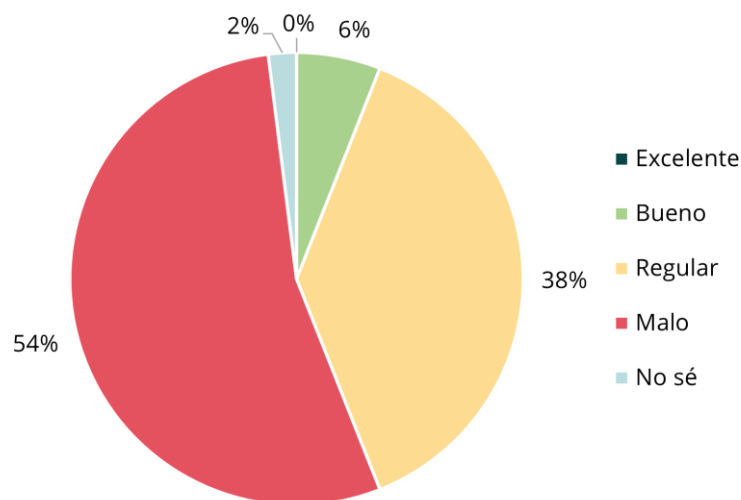


FIGURA 48. PERCEPCIÓN QUE TIENEN LOS ENTREVISTADOS SOBRE DE LA CONDICIÓN ACTUAL DE LOS ARRECIFES DE CORAL

Para evaluar la percepción de las amenazas que afectan a los arrecifes de los tres estados de la Península de Yucatán, cada encuestado evaluó las distintas amenazas tanto antropogénicas como naturales en una escala que iba de bajo a muy alto. Para el análisis de esta percepción se le dio una calificación a cada valor, donde se consideró como Bajo una calificación del 25%, Medio con 50%, Alto con 75% y Muy Alto un 100%. Al evaluar la percepción de las amenazas de acuerdo con el área de trabajo de cada encuestado se puede observar que la categoría de pesca y sobreexplotación (que incluye pesca comercial, deportiva, industrial, extracción de peces de ornato y

sobreexplotación pesquera) es la más recurrente (Tabla 22). Para el estado de Campeche, además de está, también el estrés térmico se cataloga como una preocupación para los actores locales. En Yucatán el sector turístico percibe distintas amenazas además de la pesca y sobreexplotación, como enfermedades, construcción de puertos y marinas, el mal manejo de aguas residuales, pero el grado de riesgo percibido para todo esto es medio. Para Quintana Roo la amenaza más latente es el desarrollo inmobiliario costero, el cual va de la mano con el mal manejo de aguas residuales. Es importante resaltar que estas últimas tienen un gran impacto en los arrecifes ya que conllevan al aumento de nutrientes en el mar, lo cual tiene consecuencias negativas para los corales a largo plazo, ya que tienen efectos negativos en su desempeño fisiológico (D'Angelo y Wiedenmann et al., 2014).

TABLA 22. PRINCIPALES AMENAZAS PERCIBIDAS POR REGIÓN DE ACUERDO CON CADA GRUPO ENCUESTADO

Sector del grupo	Campeche	Yucatán	Quintana Roo
Agencia de gobierno municipal, estatal o federal	Pesca y sobreexplotación.	Pesca y sobreexplotación.	Desarrollo inmobiliario costero.
AC y otros	Estrés térmico.	Pesca y sobreexplotación.	Mal manejo de aguas residuales.
Investigación	Estrés térmico.	Pesca y sobreexplotación.	Mal manejo de aguas residuales, enfermedades.
Sector pesquero	Pesca y sobreexplotación, depredación.	Pesca y sobreexplotación.	Pesca y sobreexplotación, estrés térmico.
Turismo	Pesca y sobreexplotación, deforestación de la zona costera.	Pesca y sobreexplotación, enfermedades, construcción de puertos y marinas, desarrollo inmobiliario costero, dragado, mal manejo de agua residuales.	Desarrollo inmobiliario costero.

En el estado de Campeche, las amenazas antropogénicas con puntaje alto o muy alto fueron la pesca y la sobreexplotación (que incluye pesca comercial, deportiva, industrial, extracción de peces de ornato y sobreexplotación pesquera), seguido del buceo y deportes acuáticos y en tercer lugar por hidrocarburos (esta categoría incluye las actividades petroleras y los derrames asociados) (Fig. 49a). Para el caso de la pesca,

debido a que los arrecifes del Banco de Campeche, en la porción de Campeche, no se encuentran bajo algún tipo de protección, no existe una regulación propiamente para lo que se extrae con las distintas artes de pesca. En el caso de los hidrocarburos, esta actividad representa una amenaza constante debido a los distintos campos petroleros que se encuentran cerca de esta zona. De los 52 yacimientos reportados por PEMEX, 17 cuentan con estatus de cerrado y uno de ellos es una terminal marítima (Cayo Arcas) (Fig. 50). Respecto de las amenazas naturales, se percibe en primero lugar como una amenaza alta o muy alta el aumento de la temperatura del mar se percibe como una amenaza muy alta; esto resalta de manera importante debido a que es una zona notable por la mayor exposición a valores elevados de estrés por calor (Fig. 32, 33). Para esta zona también resaltan los blooms algales, los cuales resultan del crecimiento masivo de organismos fitoplanctónicos durante ciertas épocas del año. Esto se debe a un incremento en la concentración de nutrientes, y pueden llegar a ocasionar la muerte de los organismos debido a las condiciones anóxicas que llegan a crear (Ortegón-Aznar et al., 2011) (Fig. 49b). Debido a los efectos del cambio climático y la eutrofización costera, se prevé que las especies asociadas a estos blooms algales aumenten en intensidad y distribución, lo que podría tener efectos cada vez más negativos en las comunidades coralinas (Bauman et al., 2010). En tercer lugar, resaltan los huracanes, a pesar de que esta región no ha tenido impacto de huracanes mayores, la lluvia asociada a las tormentas o huracanes de categoría menor pueden ocasionar graves inundaciones (Rey et al., 2019).

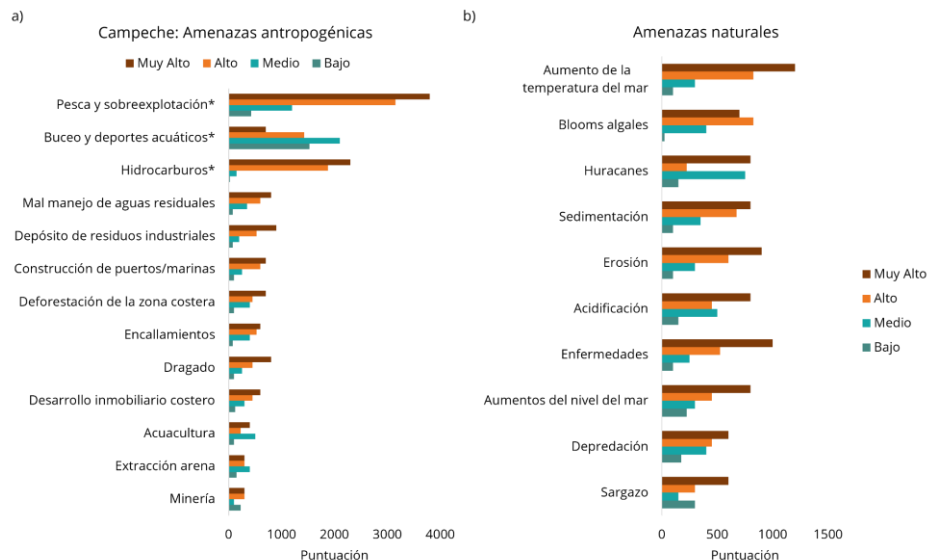


FIGURA 49. PRINCIPALES AMENAZAS PERCIBIDAS PARA EL ESTADO DE CAMPECHE

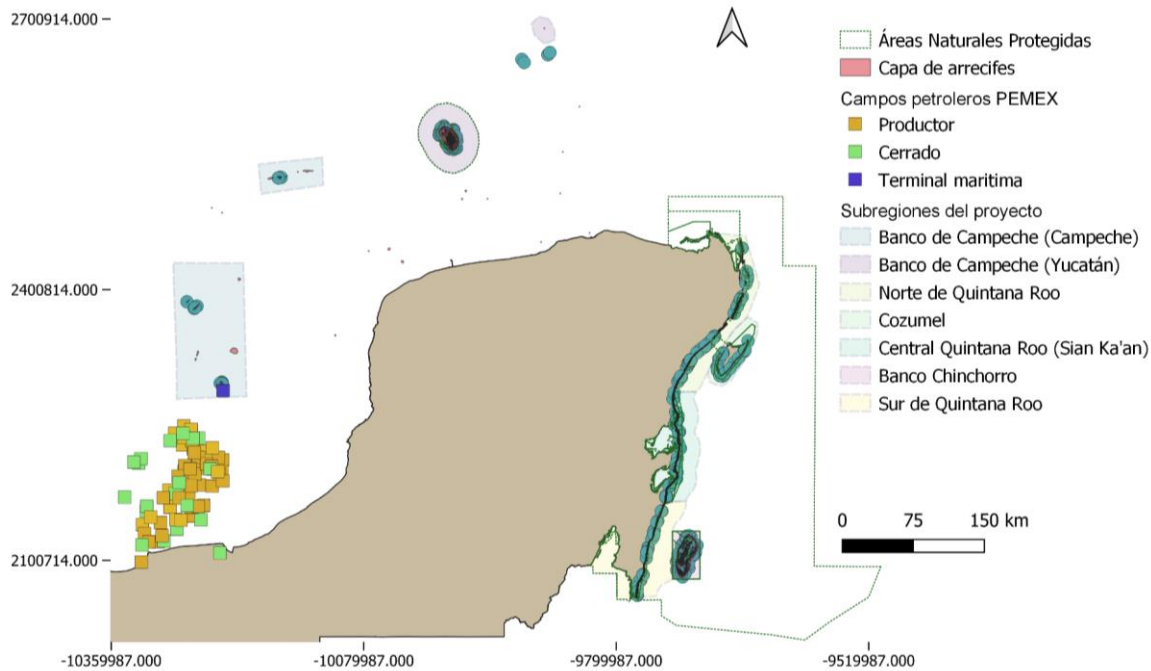


FIGURA 50. CAMPOS PETROLEROS DE PEMEX EN LA SONDA DE CAMPECHE

Fuente: CNH, 2023.

Para el estado de Yucatán, las amenazas con puntaje alto o muy alto fueron la pesca, el buceo y los deportes acuáticos, y el derrame de hidrocarburos. Yucatán es el estado con mayor permiso de embarcaciones pesqueras, por lo cual la pesca es una amenaza latente, principalmente porque hay poca vigilancia en los arrecifes del Parque Nacional Arrecife Alacranes. Esto último va de la mano con la amenaza que representan los deportes acuáticos y el buceo en esta zona. Dado que Alacranes forma parte de la sonda de Campeche, las corrientes oceánicas podrían llevar los derrames ocasionados en las plataformas petroleras provocando una fuerte contaminación (Fig. 51a). Dentro de las amenazas naturales se percibe que, al igual que en Campeche, el aumento de la temperatura del mar y blooms algales son amenazas percibidas como altas (Fig. 51b). Pero también las enfermedades son percibidas como perjudiciales para los arrecifes, está pronosticado que estas aumenten su virulencia y afectación de las comunidades coralinas derivado del aumento de la temperatura (Burke et al., 2023).

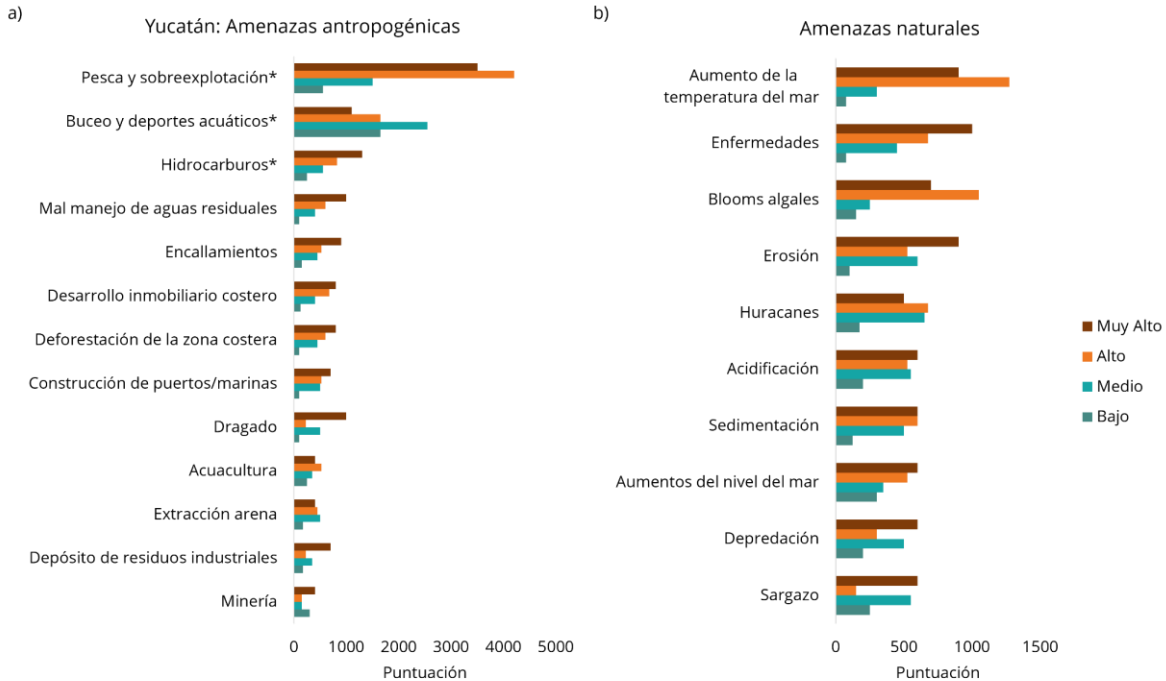


FIGURA 51. PRINCIPALES AMENAZAS PERCIBIDAS PARA EL ESTADO DE YUCATÁN

Para el estado de Quintana Roo, las amenazas con puntaje alto o muy alto fueron la pesca, las actividades de buceo, el desarrollo inmobiliario costero, el mal manejo de aguas residuales y la deforestación costera (Fig. 52a). Esto tiene una amplia relación ya que es el estado que ha tenido mayor desarrollo hotelero en los últimos 30 años (Fig. 3), que ha disminuido notablemente la duna costera, y aumentado los desechos al mar. Dentro de las amenazas naturales se percibe que, el aumento de la temperatura del mar, las enfermedades, los arribazones de sargazo, y los huracanes son las mayores amenazas (Fig. 52b). En 2018, la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro diezmoó las poblaciones de corales escleractinios de la región, en especial de especies constructoras de arrecife (Álvarez-Filip et al., 2022); mientras que los arribazones de sargazo traen consigo un incremento en los niveles de nutrientes y metales pesados que pueden afectar el ciclo biológico de los corales (Chávez et al., 2020). En cuanto a los huracanes esta zona es la que tienen el mayor número de impactos de huracanes mayores (Fig. 40), los cuales han afectado seriamente los arrecifes de la zona.

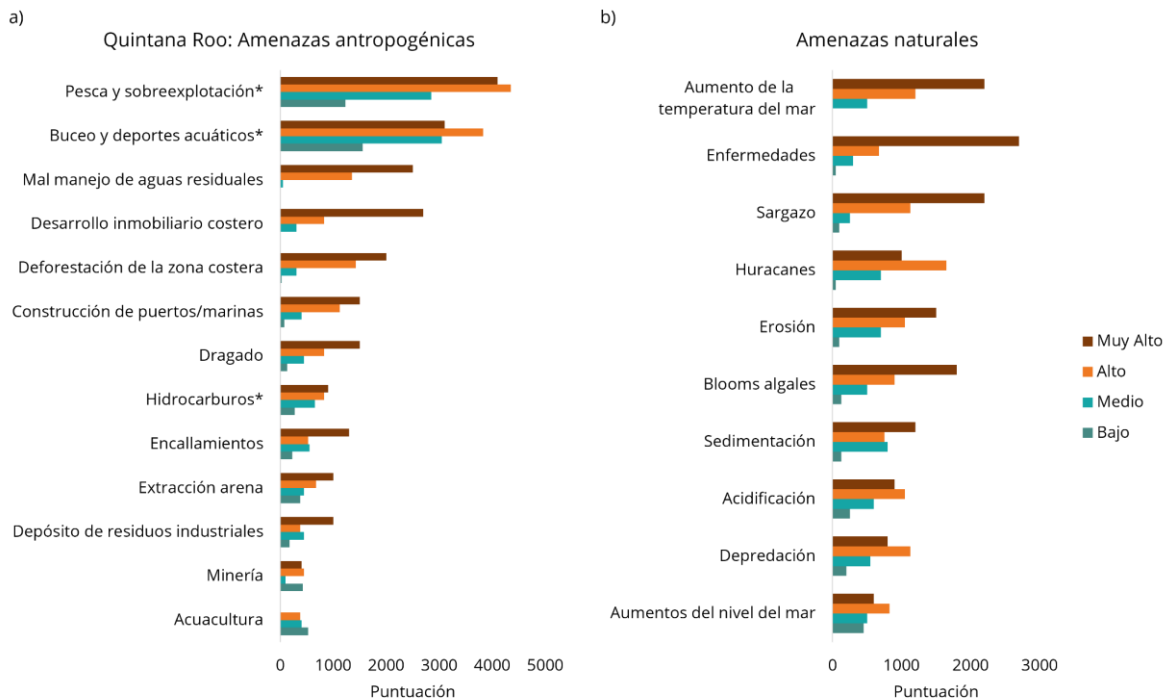


FIGURA 52. PRINCIPALES AMENAZAS PERCIBIDAS PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO

V.6.1. Recomendaciones para la implementación de estrategias de prevención y mitigación

A pesar de que las amenazas naturales son cuestiones que no se pueden controlar como las actividades antropogénicas, se ven exacerbadas por las condiciones del cambio climático, fruto de las actividades humanas, por lo cual, al mitigar estas actividades, podrían cambiar las proyecciones tan catastróficas que se prevén para las próximas décadas, en especial para el aumento de la temperatura superficial del mar y los huracanes.

En cuanto a las acciones propuestas para aumentar la protección de los arrecifes, destacan los programas de educación ambiental (Fig. 53), los cuales podrían estar enfocados a diversos sectores con el fin de concientizar no sólo a la población local, sino interesar a los sectores turísticos y pesqueros y evidenciar realmente la conexión que una buena salud arrecifal tiene con sus actividades económicas.

Otro punto importante, es crear y mejorar las zonas de protección para arrecifes; esto no es simplemente ampliar o crear más áreas de protección, sino que cada una cuente con herramientas económicas como personal para cumplir los objetivos de conservación. De igual manera es necesario que la normatividad y la legislación sean

aplicadas de correctamente, porque no sirve de nada que existan áreas de protección que no cuenten con un programa de manejo a seguir que restrinja o mitigue ciertas actividades antropogénicas.

Uno de los puntos principales a tratar para la zona costera de la Península sería legislar el desarrollo costero desmedido, que se ha incrementado en las últimas décadas de manera alarmante (Fig. 3). En especial para la zona Norte de Quintana Roo en donde la construcción de hoteles ha acabado con dunas costeras y manglares y, de la mano con los nulos programas de tratamiento de aguas residuales, se vuelven una amenaza importante para la calidad de agua de los ecosistemas arrecifales. En años recientes la zona sur y ahora la zona centro de Quintana Roo (Sian Ka'an) se han vuelto el nuevo objetivo del gobierno estatal para el desarrollo turístico (Toribio, 2023).



FIGURA 53. ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA LA PROTECCIÓN DE LOS ARRECIFES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

V.7. Identificación de objetivos y metas de conservación y restauración para las especies, ecosistemas y servicios ecosistémicos asociados los ecosistemas de arrecife de coral en cada estado

En los arrecifes de coral, el principal objetivo y meta de conservación son los corales escleractinios, ya que ellos son los constructores del arrecife y proveen de refugio a otros organismos. La mayoría de los proyectos de restauración se encuentran en el estado de Quintana Roo, especialmente en la zona Norte de Quintana Roo, mientras que para el estado de Campeche no se encontraron proyectos de restauración coralina (Tabla 23).

V.7.1. Proyectos de restauración en Yucatán

Cinvestav Unidad Mérida/CONANP: El Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos (LEEAC) de la Unidad Mérida del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav IPN) llevó a cabo un proyecto de restauración de corales y estudio del blanqueamiento en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. Este proyecto contó con el apoyo del Programa de Conservación de Especies en Riesgo (PROCER) de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

Fundación Bepensa/Facultad de Biología Marina de la UADY: En 2022, colocaron viveros en dos ubicaciones cerca de Isla Pérez. En los viveros plantaron fragmentos de oportunidad de corales ramosos: *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*.

V.7.2. Proyectos de restauración en Quintana Roo

OCEANUS A. C.: Inició en 2009 la restauración en arrecifes del Caribe mexicano (Fig. 54).

CORALIUM/UNAM: El Laboratorio de Investigación Integral para la Conservación del Arrecife inició su proyecto de restauración en 2007, en la zona norte del arrecife del Caribe Mexicano.

Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera (CRIAP) en Puerto Morelos del Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INAPESCA): En 2010, iniciaron distintos proyectos para la siembra de fragmentos de *Acropora* spp. en los arrecifes de Contoy, Cancún y Puerto Morelos.

IBEROSTAR, proyecto *Wave of Change*: Inició este proyecto de restauración en 2019.

Centro Ecológico Akumal (CEA): Inició este proyecto de restauración en 2013.

TAKATA: Proyecto de restauración de coral de Mahahual tiene como objetivo restaurar 1000 m² de arrecife degradado mediante la plantación de 5000 fragmentos de coral.

Corales Vivos: En 2020, inició su proyecto de restauración dentro del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (<https://www.sica.int/mar2r/proyecto-restauracion-ecologica>).



FIGURA 54. *ACROPORA PALMATA* RESTAURADA POR OCEANUS EN ARRECIFE JARDINES EN PUERTO MORELOS, NORTE DE QUINTANA ROO

TABLA 23. ORGANIZACIONES Y SITIOS DE RESTAURACIÓN EN LAS DIFERENTES REGIONES DE YUCATÁN Y QUINTANA ROO

Región usada en análisis de arrecifes	Organización	Sitio de restauración	Latitud	Longitud
Banco Campeche en Yucatán	Fundación Bepensa	Isla Pérez	22.382403	-89.688225
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	CORALIUM	Pajaritos	19.6722861	-87.417244
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	Oceanus A.C.	Punta Allen	19.739874	-87.418218
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	Oceanus A.C.	María Elena La Poza	19.457694	-87.441697
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	Oceanus A.C.	Trasplante Faro	19.31689	-87.43832
Norte de Quintana Roo	Centro Ukana I Akumal, A.C	Akumal	20.387778	-87.314116
Cozumel	Corales VIVOS	Cozumel	20.314565	-87.030132
Cozumel	Iberostar Group & CINVESTAV Group	Cozumel	20.314565	-87.030132
Cozumel	Oceanus A.C.	Chankanaab	20.442498	-86.995572
Cozumel	Oceanus A.C.	El Palmar	20.459119	-86.986468
Norte de Quintana Roo	Oceanus A.C.	Rodman	20.870556	-86.853884
Norte de Quintana Roo	Oceanus A.C.	Jardines	20.831163	-86.880334
Norte de Quintana Roo	Oceanus A.C.	La Pared	20.823953	-86.876528
Norte de Quintana Roo	Oceanus A.C.	Mayakobá	20.678092	-87.015281
Norte Quintana Roo	Centro Ecológico Akumal	Akumal	20.387778	-87.314116
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Cuevones	21.161694	-86.740972
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Limonas	20.98804	-86.79716
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Cuevones	20.91897	-86.830149
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Manchones	20.97855	-86.800631
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Picudas	20.88385	-86.848144
Norte Quintana Roo	CORALIUM	Jardines	20.830981	-86.874981
Norte de Quintana Roo	Coralisma	Jardines	20.83231149	-86.87888837
Norte de Quintana Roo	Coralisma	Radio Pirata	20.8534084	-86.8646544

Región usada en análisis de arrecifes	Organización	Sitio de restauración	Latitud	Longitud
Norte de Quintana Roo	Coralisma	La Bocana	20.8740441	-86.8513015
Norte de Quintana Roo	Coralisma	Tanchacté	20.9078761	-86.8340650
Norte de Quintana Roo	Coralisma	Cazones	20.9023849	-86.8366481
Norte de Quintana Roo	Coralisma	La Pared	20.8248365	-86.8756459
Norte Quintana Roo	Iberostar Group & CINVESTAV Group	Playa Paraíso	20.75781	-86.9554802
Norte Quintana Roo	Wave of Change & Iberostar Group	Manchoncitos	20.75781	-86.9554802
Sur Quintana Roo	CORALIUM	Quebrado	19.365458	-87.439407
Sur Quintana Roo	CORALIUM	Portillas	19.6722861	-87.833233
Sur Quintana Roo	Oceanus A.C.	La Poza XC	18.260935	-87.82558
Sur Quintana Roo	Oceanus A.C.	Parche Chol	18.216738	-87.831978
Sur Quintana Roo	Oceanus A.C.	Rio Bermejo	18.685029	-87.715526
Sur Quintana Roo	Oceanus A.C.	Margarita del Sol	18.667874	-87.71932
Sur Quintana Roo	Oceanus A.C.	Acocote	18.341611	-87.807633
Sur Quintana Roo	Takata	Mahahual	18.705343	-87.70957

V.8. Evaluación de la capacidad humana para hacer la restauración, con técnicas adecuadas y personal capacitado y suficiente

El éxito de la restauración de arrecifes se puede medir utilizando como parámetros indicadores biológicos como son la densidad de peces, porcentaje de cobertura de coral vivo y macroalgas, y la densidad de invertebrados. Por esto es de suma importancia contar con una línea base de los arrecifes a intervenir, para poder tener un punto de comparación antes y después de las acciones. De igual forma los efectos de los esfuerzos de restauración se pueden observar en un mediano o largo plazo (años), para lo cual es importante la constancia en el seguimiento en el tiempo. Gran parte de los proyectos de restauración no monitorea indicadores relevantes para el objetivo de su proyecto o realizan monitoreos durante un periodo corto (meses), lo que podría inflar artificialmente los datos de crecimiento o sobrevivencia (Bayraktarov et al., 2019; Boström-Einarsson et al., 2018). Además, es importante que se sigan ciertos

estándares para los proyectos de restauración y que sus resultados puedan ser comparables, para lo cual existe un guía integral para monitorear las actividades de restauración de arrecifes de coral (ej. Shaver et al., 2020).

Uno de los factores determinantes del éxito de estos esfuerzos, es la sostenibilidad financiera, ya que por lo general la duración de los proyectos puede ser en promedio de 3 años (Bayraktarov et al. 2020). Las fuentes de financiamiento de los proyectos de restauración deben ser diversas e incluir fondos gubernamentales, donaciones privadas y colaboraciones con organizaciones no gubernamentales. Además de involucrar a las comunidades locales para generar alianzas para la inversión en investigación y continuidad de los proyectos. El costo anual promedio de los proyectos de restauración coralina en 2018 fue de \$93,000 dólares para abarcar un área de 1 hectárea en promedio (Bayraktarov et al. 2020).

La capacidad humana para llevar a cabo la restauración en los arrecifes de la Península de Yucatán es un factor clave en los esfuerzos de conservación y recuperación de estos ecosistemas marinos. A través del análisis espacial, se destaca que la gran mayoría de las iniciativas y actividades de restauración se concentran en la parte Norte de Quintana Roo, donde también se encuentra una mayor diversidad de grupos de trabajo involucrados en estos esfuerzos (Fig. 55 y 56). Desde 2018 The Nature Conservancy en colaboración con la CONANP y MAR Fund han capacitado a más de 100 brigadistas para la atención post tormenta a arrecifes, quienes en su mayoría residen en Puerto Morelos. También existen brigadistas en Cancún, Playa del Carmen y Cozumel, con disposición a moverse según lo requieran las acciones de restauración. De igual forma, en 2021-2022, el CRIAP de INAPESCA en Puerto Morelos también capacitó a distintas personas en cuestiones de restauración como resultado del proyecto del Seguro Paramétrico, fondos que surgieron después del paso de los huracanes de 2020 (CGC, 2020).

En la zona Norte, se observa una colaboración significativa entre organizaciones de la sociedad civil, instituciones gubernamentales y universidades o centros de investigación. Esta sinergia entre diferentes actores es fundamental para implementar proyectos efectivos de restauración, ya que se aprovechan los recursos y el conocimiento de diversas disciplinas para abordar los desafíos complejos que enfrentan los arrecifes de coral.

Por otro lado, en la parte centro y sur de Quintana Roo, la gran mayoría de los esfuerzos de restauración han sido liderados por Oceanus, lo que destaca el papel crucial que esta organización ha desempeñado en la promoción de la restauración de los arrecifes

en esta área. La capacidad y la experiencia de Oceanus han sido fundamentales para llevar a cabo acciones de restauración y promover la participación de diferentes actores en la conservación de los arrecifes de coral.

Sin embargo, es importante hacer notar que la restauración de arrecifes es un desafío complejo y requiere del compromiso y colaboración de múltiples actores en toda la Península de Yucatán. Uno de los aspectos negativos es que muchas veces los brigadistas son pocos; a pesar del gran número de brigadistas capacitados, los que se encuentran activos representan menos del 50%. Este declive está dado por cambios de residencia, disponibilidad de tiempo o por cuestiones económicas.

Es fundamental que se fomenten y apoyen más iniciativas y esfuerzos de restauración en todas las regiones para abordar las problemáticas específicas de cada área y mejorar la resiliencia de los arrecifes de coral en todo el territorio. En conclusión, la capacidad humana para realizar restauración en los arrecifes de la Península de Yucatán es crucial para su conservación y recuperación. Si bien existe una mayor concentración de esfuerzos en la parte Norte de Quintana Roo, es necesario ampliar las acciones de restauración en toda la región, aprovechando la colaboración entre diferentes actores para promover la salud y sostenibilidad de estos valiosos ecosistemas marinos. De igual forma es necesario crear una partida económica enfocada en estas acciones de restauración, ya que muchas veces los brigadistas y las ANP dependen de baja fondos externos para poder cubrir los materiales, embarcaciones y jornales.

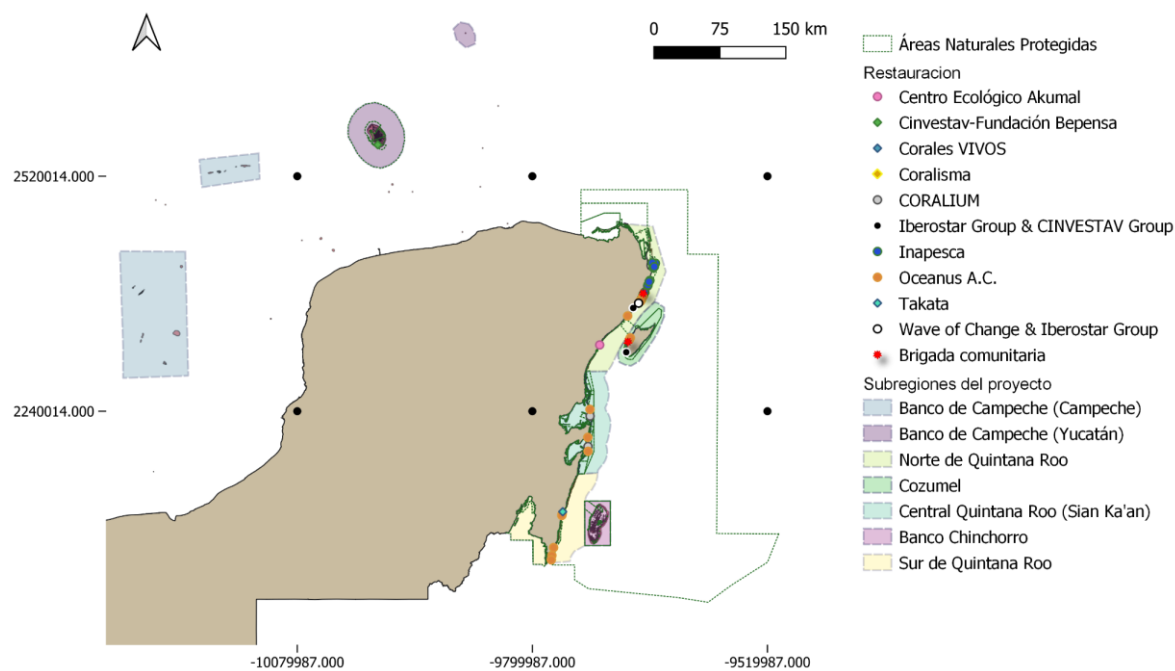


FIGURA 55. PROYECTOS DE RESTAURACIÓN ESTABLECIDOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

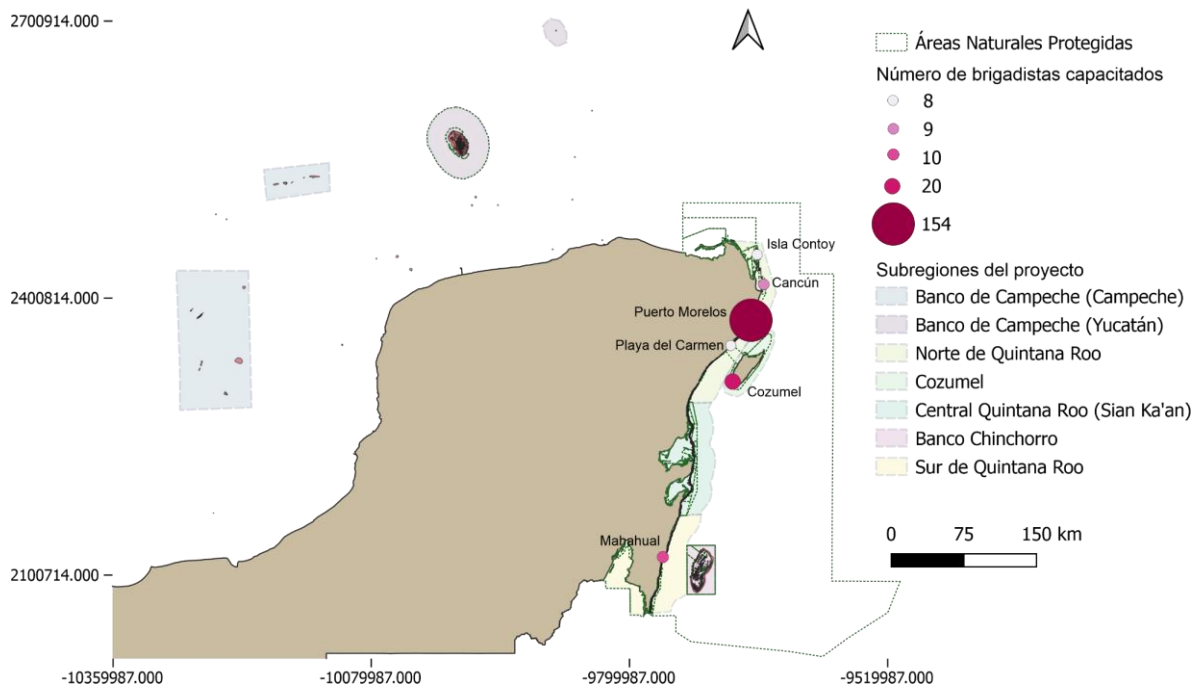


FIGURA 56. BRIGADISTAS CAPACITADOS PARA ACCIONES DE RESTAURACIÓN EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La Península de Yucatán cuenta con diversas áreas naturales protegidas con porción marina que juegan un papel crucial en la conservación de los arrecifes coralinos de la

región, especialmente en el estado de Quintana Roo (Fig. 57). La ANP más destacada es la del Caribe Mexicano, que abarca prácticamente todo el mar territorial de la costa de Quintana Roo, y protege gran parte de los arrecifes coralinos de la zona. En el Banco de Campeche, el Arrecife Alacranes es la única zona protegida.

En la zona Norte de Quintana Roo, encontramos algunas áreas completamente protegidas, como la Costa Occidental e Isla Mujeres, así como algunas regiones en Cozumel. En la zona Centro de Quintana Roo, destaca el área protegida de Sian Ka'an, que cuenta con polígonos completa y altamente protegidos cerca de zonas de agregación de peces. En la zona Sur de Quintana Roo, las áreas completamente protegidas dentro de las ANP de Arrecifes de Xcalak y Banco Chinchorro son especialmente importantes para la conservación de los arrecifes coralinos.

Finalmente, en el Arrecife Alacranes, encontramos los polígonos completamente protegidos más grandes con la presencia de arrecifes coralinos en toda la región de la Península de Yucatán. Estas áreas marinas protegidas son esenciales para salvaguardar la biodiversidad marina, promover la recuperación de ecosistemas y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los valiosos arrecifes de coral de la Península de Yucatán. Sin embargo, también es importante continuar fortaleciendo la gestión y la protección de estas áreas para enfrentar los desafíos que enfrentan los ecosistemas marinos en el contexto del cambio climático y la actividad humana.

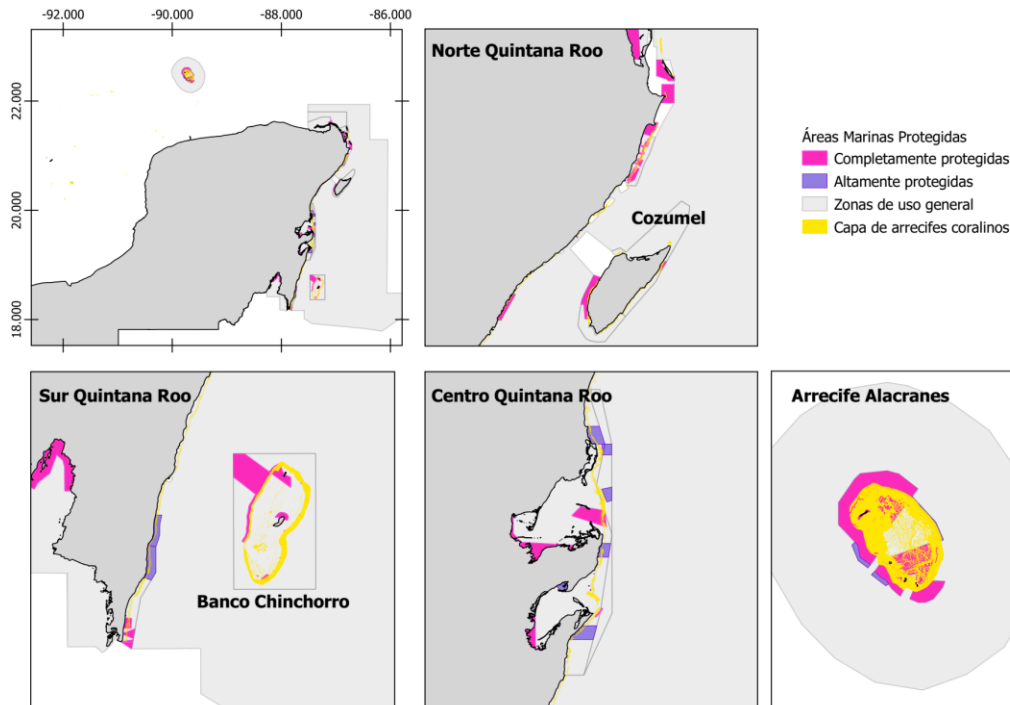


FIGURA 57. ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS CON PORCIÓN MARINA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

A pesar de la existencia de múltiples ANP con porción marina en la Península de Yucatán, es importante reconocer que no todos los polígonos tienen el mismo efecto positivo en la capacidad adaptativa o de recuperación de los arrecifes coralinos. Dentro de estas ANP, destacan las zonas completamente protegidas como las más efectivas para el mejoramiento de las condiciones de estos valiosos ecosistemas.

Las áreas completamente protegidas, donde se prohíbe cualquier tipo de actividad humana, juegan un papel fundamental en la conservación de los arrecifes coralinos, algo que ha sido comprobado en el Arrecife Mesoamericano (Fig. 58). Al no estar sujetas a la explotación directa por parte de las actividades humanas, estas zonas permiten que los ecosistemas marinos se desarrollen de manera más natural y que la vida marina prospere sin perturbaciones significativas. Esto crea un refugio seguro para las especies de corales y otros organismos, lo que favorece la capacidad adaptativa y la resiliencia de los arrecifes frente a los desafíos del cambio climático y otros factores de estrés.



FIGURA 58. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE DOS GRUPOS DE PECES COMERCIALES BAJO DISTINTOS RANGOS DE PROTECCIÓN DE ANP

Fuente: Tomado de McField et al., 2022

Estas zonas completamente protegidas ofrecen oportunidades fundamentales para la recuperación y la regeneración de los arrecifes de coral. Al permitir que los corales crezcan y se reproduzcan sin interferencias humanas, se fomenta la colonización de nuevas áreas y la expansión de poblaciones de corales resilientes. Además, al ser áreas donde se preserva la biodiversidad marina, se mantiene la integridad de los hábitats y los procesos ecológicos esenciales para la salud del ecosistema. De igual manera diversos estudios han observado que la protección está positivamente relacionada con la cobertura de coral, abundancia de peces y la integridad del hábitat bentónico (Rioja-Nieto & Sheppard, 2008; Schmitter-Soto et al., 2018; Suchley & Álvarez-Filip, 2018).

Sin embargo, es importante destacar que la efectividad de las ANP puede depender de la adecuada gestión y monitoreo de estas áreas. En las últimas décadas el presupuesto que el gobierno federal le otorgó a las ANP del Caribe mexicano ha disminuido considerablemente (Fig. 59), pero el área de protección aumentó en 90% con el establecimiento de la Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano en 2016. Así, en 2017, el gobierno federal estaba destinando solamente 81 pesos mexicanos por cada km² para la gestión y el manejo de las ANP con porción marina. Desafortunadamente, a pesar de este aumento en la protección, el presupuesto anual otorgado para las ANP ha tenido un recorte drástico desde 2007, lo que se traduce en menos recursos financieros y humanos para la adecuada gestión y manejo de las ANP.

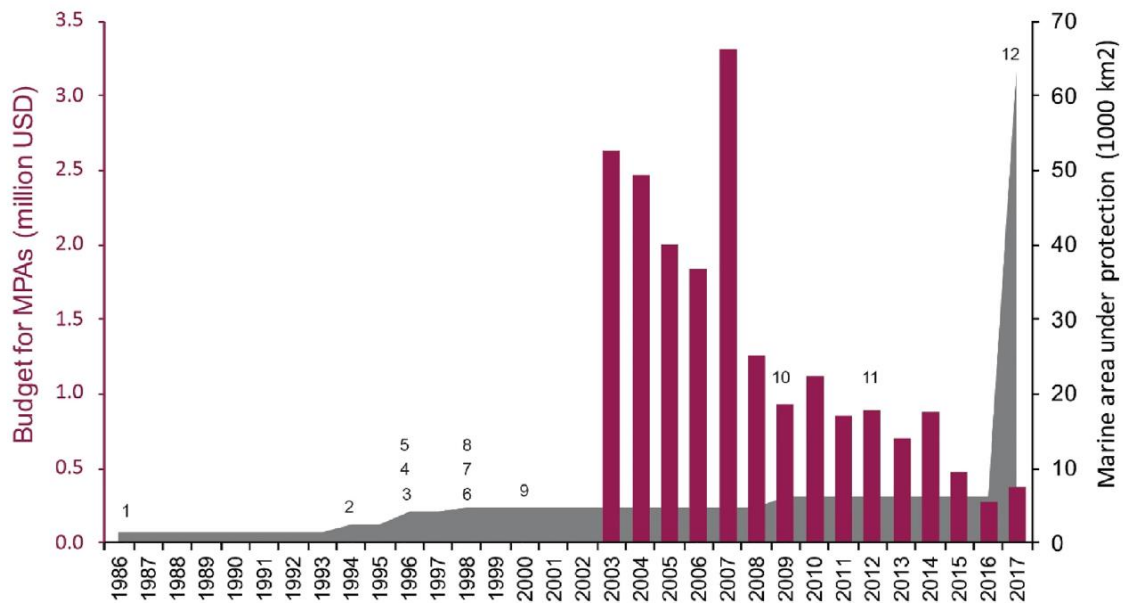


FIGURA 59. PRESUPUESTO, AÑOS DE ESTABLECIMIENTO, Y ÁREA MARINA BAJO PROTECCIÓN PARA 12 ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS CON PORCIÓN MARINA DEL CARIBE MEXICANO

Fuente: tomado de Rioja-Nieto y Álvarez-Filip 2019. Las barras representan el presupuesto gubernamental en dólares desde 2003. El área gris representa la porción marina bajo protección de 1986-2017. Los números corresponden al año de decreto de cada ANP: (1) Reserva de la Biosfera (RB) de Sian Ka'an; (2) Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) de Yum Balam; (3) Parque Nacional (PN) Arrecifes de Cozumel; (4) PN Costa Occidental De Isla Mujeres, Punta Cancún Y Punta Nizuc; (5) RB Banco Chinchorro; (6) PN Arrecife de Puerto Morelos; (7) PN Isla Contoy; (8) RB Arrecifes De Sian Ka'an; (9) PN Arrecifes de Xcalak; (10) RB Tiburón Ballena; (11) APFF Isla de Cozumel; (12) RB Caribe Mexicano.

Es necesario implementar políticas y prácticas que aseguren el cumplimiento de las regulaciones y que garanticen la protección efectiva de estas zonas. Además, es fundamental realizar investigaciones y estudios científicos para comprender mejor el funcionamiento de los arrecifes coralinos y cómo las áreas protegidas pueden contribuir a su conservación y restauración. Además de estos estudios es necesario que las ANP estén reguladas y gestionadas a través de toma de decisiones que consideren a todos los sectores que desempeñan actividades dentro de las áreas, con lo cual se aumentaría la probabilidad de cumplir realmente con los objetivos sociales y ecológicos de las ANP y que no solamente queden en papel (Pérez-Cervantes et al., 2017). Suchley y Álvarez-Filip (2018) observaron que la cobertura de coral está positivamente relacionada con las características de las ANP como lo es la edad, la eficacia y el tamaño del área (Fig. 60). Realizaron tres proyecciones a 20 años considerando distintos tipos de manejo de las ANP, en una de los cuales el efecto de protección se reducía significativamente en sitios que tenían un alto desarrollo costero y contaminación

marina, por lo cual las ANP deben tener marcos de gestión más amplios que incluyan mitigar las actividades humanas en tierra, tales como el desarrollo costero desmedido y el tratamiento de aguas residuales.

En resumen, las zonas completamente protegidas dentro de las áreas naturales protegidas con porción marina son esenciales para mejorar las condiciones de los arrecifes coralinos en la Península de Yucatán. Estas áreas brindan un refugio seguro y promueven la capacidad adaptativa y la recuperación de los ecosistemas marinos. Sin embargo, es necesario un compromiso continuo para garantizar la efectividad y el éxito a largo plazo de estas áreas protegidas en la conservación de los valiosos arrecifes de coral de la región.

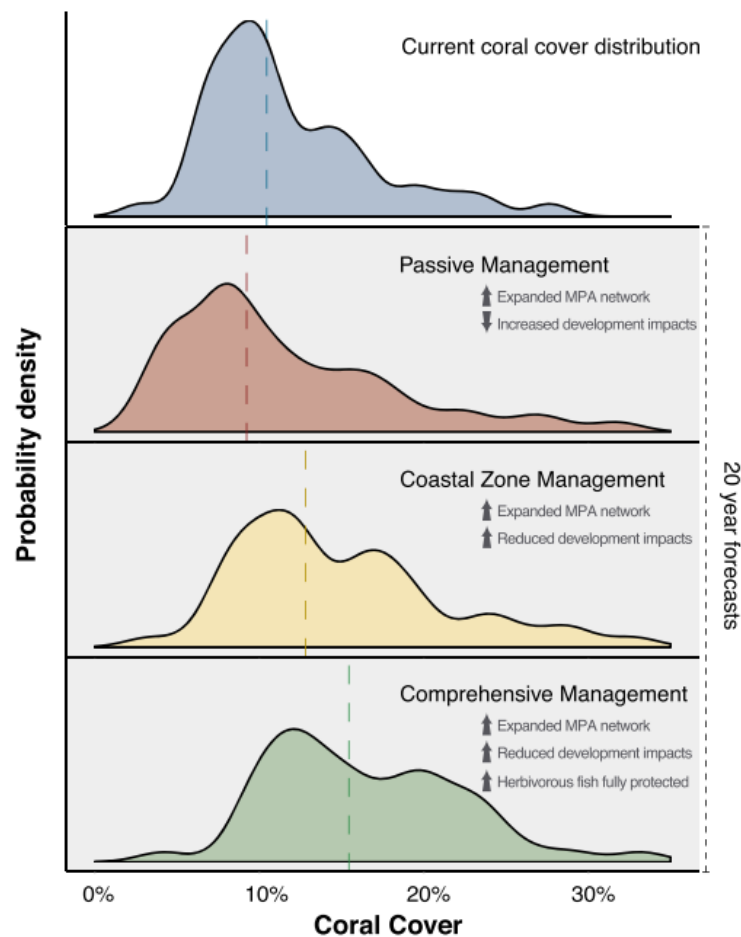


FIGURA 60. ESCENARIOS FUTUROS DE LA COBERTURA DE CORAL DEL CARIBE MEXICANO CONSIDERANDO TRES ESCENARIOS DE MANEJO DE ANP

Fuente: Tomado de Suchley y Álvarez-Filip, 2018.

VI. Conclusiones

- El estado de salud de los arrecifes de coral en la Península de Yucatán varía de acuerdo con la región y al indicador de salud arrecifal. El Banco de Campeche presenta un estado de salud calificado como bien, Cozumel obtuvo una calificación regular, mientras que las demás regiones se encuentran en un estado calificado como mal.
- Los arrecifes en la región del Banco de Campeche (tanto en Campeche como en Yucatán) presentan una cobertura de coral calificada como "buena" según el índice de HRI, mientras que las regiones de Quintana Roo tienen un estado regular.
- Existen diferencias significativas en la cobertura de coral entre los arrecifes del Banco de Campeche y el Norte de Quintana Roo.
- En Quintana Roo se detectó un incremento significativo de la cobertura hasta 2018; posteriormente se observó un decremento notable, muy probablemente debido a la presencia y afectación de Perdida de Tejido de Coral Duro (SCTLD).
- En cuanto a la cobertura de macroalgas carnosas, todas las regiones se encuentran en un estado entre crítico y malo. Respecto a la biomasa de peces herbívoros, todas las regiones están en un estado entre malo y regular, excepto Cozumel, que tiene una calificación muy buena en el índice de salud.
- La biomasa de peces herbívoros es significativamente diferente en Cozumel en comparación de otras subregiones como el Banco de Campeche en Yucatán (Arrecife Alacranes), Banco Chinchorro y las regiones Norte, Centro y Sur de Quintana Roo.
- Respecto a la biomasa de peces comerciales casi todas las regiones se encuentran calificadas como muy bien, exceptuando el Sur de Quintana Roo cuya calificación es bien y tanto el Centro de Quintana Roo (Sian Ka'an) como Banco Chinchorro tuvieron una calificación regular.
- La información del estado de salud arrecifal del Banco de Campeche es escasa; dado que los arrecifes se encuentran a una lejanía considerable de la costa, aproximadamente de 200 km, los estudios ecológicos de la zona son limitados.
- La información respecto a distintos indicadores (ej. número de brazaletes, permisos de restauración etc.) es difícil de conseguir, debido a una falta de sistematización de la información. Este es un problema recurrente en las ANP, por lo cual consideramos necesario tener un acercamiento con las diferentes ANP, y con otras instituciones como la CONAPESCA o la PROFEPA. La colaboración entre las distintas instituciones podría generar una buena base de

datos que recolecte y sistematice la información necesaria para nutrir proyectos que busquen información como la que solicitamos.

- Las regiones de Quintana Roo han sido las más afectadas por enfermedades coralinas, en especial por la enfermedad de Pérdida de Tejido de Coral Duro (SCTLD), la cual ha ocasionado una significativa pérdida en la cobertura de coral. Estas regiones son especialmente vulnerables ante enfermedades.
- Las especies masivas y meandroides son las más sensibles a la enfermedad de Pérdida de Tejido de Coral Duro (SCTLD). Mientras que las especies de coral *Agaricia* spp., *Porites* spp. y *Orbicella* spp son las más sensibles al blanqueamiento por estrés térmico.
- El Banco de Campeche es la región con mayor exposición a elevados valores de estrés térmico, seguida del Centro de Quintana Roo (Sian Ka'an) y Banco Chinchorro.
- Los patrones de estrés por calor resaltan la elevada exposición que ha existido en la última década. En 2020 y 2021 se presentaron eventos de exposición al estrés térmico que afectó gran parte de las regiones. A pesar de no entrar dentro de nuestro periodo de estudio, en 2023 se está presentando un devastador evento de estrés térmico que ha derivado en un blanqueamiento masivo de los corales y en altas mortandades.
- Las proyecciones a futuro indican que los arrecifes de la región de la Península de Yucatán enfrentan un futuro incierto y desafiante debido al estrés por calor y la probabilidad creciente de eventos de blanqueamiento bajo diferentes escenarios de calentamiento global.
- Para el Banco de Campeche (zona Campeche y Yucatán) sólo se han registrado tormentas y huracanes de categoría 1. Mientras que las regiones Norte y Centro de Quintana Roo son las zonas que han recibido mayor número huracanes, incluidos huracanes de categorías 4 y 5 (huracanes mayores).
- Los huracanes afectan principalmente a los corales de formas ramificadas.
- La sensibilidad a los huracanes exhibe una marcada variación espacial que está estrechamente vinculada a la cobertura de coral total.
- En Quintana Roo existe una gran presencia de proyectos de restauración coralina, en especial en la Región Norte. Esta región cuenta con más de 50 brigadistas capacitados para acciones de restauración después del paso de una tormenta.
- Los fondos económicos para sustentar los proyectos de restauración son una parte fundamental para que estos se lleven a término con éxito. De igual forma

deben de estar acompañados de un asesoramiento científico y de monitoreo constante.

- Las zonas de arrecife coralino completamente dentro de la poligonal de ANP con porción marina tienen las mejores condiciones en la Península de Yucatán.
- Es necesario un compromiso continuo para garantizar la efectividad y el éxito a largo plazo de estas áreas protegidas en la conservación de los valiosos arrecifes de coral de la región.

VII. Lecciones aprendidas

Realizar la compilación de información climatológica, ecológica, y social en el plazo establecido para el contrato representó un reto. A continuación, se describen los distintos obstáculos encontrados, así como las lecciones aprendidas.

Primeramente, el reto respecto a los datos ecológicos es que muchas veces estos pertenecen a distintos grupos de investigación, que tienen trabajos en curso con dichos datos, por lo cual no creen pertinente compartirlos. Otro punto importante es que no todos los arrecifes de la Península de Yucatán han sido suficientemente estudiados, por lo cual existen muchos vacíos de información tanto espaciales como temporales. En particular, el Banco de Campeche es considerada aún una zona bastante inexplorada, a pesar de que, en la zona de Cayo Arcas, PEMEX ha realizado distintos estudios, entre ellos los realizados por Jordán-Dahlgren en 1997 y 2002; estos datos se encuentran protegidos y no son de uso público.

Pero existen distintas organizaciones de la sociedad civil, como HRI, que han creado redes de colaboración con diversas instituciones por lo cual sus datos son accesibles, y fueron utilizados en este estudio. Es importante resaltar que el monitoreo de los arrecifes coralinos en México se ha hecho con mayor constancia y con metodologías estandarizadas desde el año 2000.

En cuanto a los datos climatológicos, en México existen diversos servicios, entre estos el Sistema Meteorológico Nacional (SMN); no obstante, el SMN no se enfoca en datos de parámetros marinos, y aunque posee información histórica sobre los ciclones tropicales, esta se compone mayormente de reseñas, por lo que no fue de utilidad para el estudio. Otra fuente de información fue la Secretaría de Marina (SEMAR), que posee datos colectados por boyas; esta fue solicitada mediante correo electrónico, pero a pesar de su respuesta positiva, solamente proporcionaron información del periodo 2009-2022, por lo que no fue utilizada en el presente trabajo. Considerado lo anterior, se decidió utilizar datos provenientes de Coral Reef Watch, que proveen información de la Temperatura de la Superficie del Mar a Nivel Global con una resolución espacial de 5 km.

Otro reto fue obtener información para los distintos indicadores y los criterios referidos en el Anexo 1: "Base de datos de indicadores y criterios para análisis de coral"; por ejemplo, el número de visitantes por año (o número de brazaletes), número de operadores turísticos, número de permisos para restauración, número de miembros de brigadas para restaurar, número de embarcaciones turísticas y pesqueras autorizadas, número de pescadores autorizados y la frecuencia de ocurrencia de

derrames de hidrocarburo. Para esto se contactó a los directores de las áreas naturales protegidas de categoría federal en la Península de Yucatán. A pesar de que la solicitud fue enviada a través del FMCN como respaldo, solamente respondieron las direcciones de cuatro áreas naturales protegidas (ANP) federales.

Además de este pedido, también se envió una solicitud al Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI). Su respuesta llegó casi al término de este estudio, pero en su mayoría indicaron que no poseían la información solicitada, que no existe obligación para elaborar documentos *ad hoc* para atender solicitudes de accesos a la información, y que sólo proporcionan información en el formato que esté disponible.

También se contactó por correo a Fernando Secaira, Especialista en resiliencia y riesgo costero al clima en The Nature Conservancy, para solicitar información sobre el número de hoteles en la costa de Quintana Roo. Él recomendó no usar sus datos de 2016, ya que no están actualizados. En su lugar se usaron datos del INEGI por municipio de cada estado, que no distinguen los correspondientes a los hoteles que están en la costa, pero sí representan una buena aproximación sobre la información de número de habitaciones.

VIII. Fuentes de consulta

- Aeby, G. S., Ushijima, B., Campbell, J. E., Jones, S., Williams, G. J., Meyer, J. L., Häse, C., & Paul, V. J. (2019). Pathogenesis of a Tissue Loss Disease Affecting Multiple Species of Corals Along the Florida Reef Tract. *Frontiers in Marine Science*, 6(678), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00678>
- Agencias. (2023, enero 24). Encalla embarcación de Estados Unidos cerca de la Biósfera de Sian Ka'an. *Noticaribe*. Retrieved from <https://noticaribepeninsular.com.mx/encalla-embarcacion-de-estados-unidos-cerca-de-la-biosfera-de-sian-kaan/>
- AgenciaSIM. (2023, abril 16). Encalla velero frente a costas de Puerto Aventuras. *Noticaribe*. Retrieved from <https://noticaribe.com.mx/2023/04/16/encalla-velero-frente-a-costas-de-puerto-aventuras/>
- Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: Region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019–3025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0339>
- Álvarez-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*.
- Álvarez-Filip, L., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Molina-Hernández, A., & González-Barrios, F. J. (2019). A rapid spread of the Stony Coral Tissue Loss Disease outbreak in the Mexican Caribbean. *PeerJ*, 7(e8069), 1–17. <https://doi.org/10.7717/peerj.8069>
- Álvarez-Filip, L., González-Barrios, F. J., Pérez-Cervantes, E., Molina-Hernández, A., & Estrada-Saldívar, N. (2022). Stony coral tissue loss disease decimated Caribbean coral populations and reshaped reef functionality. *Communications Biology*, 5(440), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03398-6>
- Arias-González, J. E., Fung, T., Seymour, R. M., Garza-Pérez, J. R., Acosta-González, G., Bozec, Y.-M., & Johnson, C. R. (2017). A coral-algal phase shift in Mesoamerica not driven by changes in herbivorous fish abundance. *PLoS ONE*, 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174855>
- Bayraktarov, E., Banaszak, A. T., Maya, P. M., Kleypas, J., Arias-Gonzalez, J. E., Blanco, M., Calle-Triviño, J., Charuvi, N., Cortes-Useche, C., Galvan, V., Salgado, M. A. G., Gnecco, M., Guendulain-Garcia, S. D., Delgado, E. A. H., Moraga, J. A. M., Maya, M. F., Quiroz, S. M., Cervantes, S. M., Morikawa, M., ... Frias-Torres, S. (2020). Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories. *PLoS ONE*, 15(8 August), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228477>
- Ban, S. S., Graham, N. A. J., & Connolly, S. R. (2014). Evidence for multiple stressor interactions and effects on coral reefs. *Global Change Biology*, 20(3), 681–697. <https://doi.org/10.1111/gcb.12453>

- Bauman, A. G., Burt, J. A., Feary, D. A., Marquis, E., & Usseglio, P. (2010). Tropical harmful algal blooms: An emerging threat to coral reef communities? *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2117–2122. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.08.015>
- Blanchon, P., Iglesias-Prieto, R., Jordán-Dahlgren, E., & Richards, S. (2010). Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. *Vulnerabilidad de Las Zonas Costeras Mexicanas Ante El Cambio Climático*, 229–248.
- Bongaerts, P., Ridgway, T., Sampayo, E. M., & Hoegh-Guldberg, O. (2010). Assessing the ‘deep reef refugia’ hypothesis: focus on Caribbean reefs. *Coral Reefs*, 29(2), 309–327. <https://doi.org/10.1007/s00338-009-0581-x>
- Boström-Einarsson, L., Ceccarelli, D., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Cook, N., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Boström-einarsson, L., Ceccarelli, D., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Stewart-Sinclair, P J Vardi, T., & McLeod, I. M. (2018). Coral restoration in a changing world -A global synthesis of methods and techniques, report to the National Environmental Science Program. In Report to the National Environmental Science Program. <https://nesptropical.edu.au/wp-content/uploads/2019/02/NESP-TWQ-Project-4.3-Technical-Report-1.pdf>
- Bozec, Y. M., Álvarez-Filip, L., & Mumby, P. J. (2015). The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. *Global Change Biology*, 21(1), 223–235. <https://doi.org/10.1111/gcb.12698>
- Burke, L., Reyntar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). Reefs at risk. In *National Geographic*. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(79\)90136-9](https://doi.org/10.1016/0022-0981(79)90136-9)
- Burke, S., Pottier, P., Lagisz, M., Macartney, E. L., Ainsworth, T., Drobniak, S. M., & Nakagawa, S. (2023). The impact of rising temperatures on the prevalence of coral diseases and its predictability: A global meta-analysis. *Ecology Letters*, May 1–16. <https://doi.org/10.1111/ele.14266>
- Byrnes, T. A., & Dunn, R. J. K. (2020). Boating-and shipping-related environmental impacts and example management measures: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–49. <https://doi.org/10.3390/jmse8110908>
- Caballero, S. (2013, agosto 1). Embarcación de EU encalla y afecta corales de Quintana Ro. PROCESO. Retrieved from <https://www.proceso.com.mx/nacional/2013/8/1/embarcacion-de-eu-encalla-afecta-corales-de-quintana-roo-121627.html>
- Cabrera, E. (2013, agosto 4). Yate hundido en arrecife Alacranes, convertido en “atractivo turístico.” EXCELSIOR. Retrieved from <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/08/05/912233>
- Campuzano, J. (2023, julio 7). Explosión e incendio en plataforma en Cantarell de Pemex deja 6 heridos. *Excelsior*. <https://www.excelsior.com.mx/nacional/video-incendio-plataforma-pemex-cantarell-campeche-7-julio-2023/1596471>

- Causa Natura. (2023). Pescando datos: Transparenta, analiza y difunde información oficial de las políticas pesqueras. <https://pescandodatos.causanatura.org/>
- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., Ressler, R. (2018-2021). Sistema de Información y Análisis Marino-Costero (SIMAR). CONABIO, México. Recuperado de <https://simar.conabio.gob.mx>
- Cerdeira-Estrada, S., R. Martell-Dubois, J. Valdéz, R. Ressler. 2020. Daily nighttime Sea Surface Temperature (NSST) (L4-blended, daily, 1-km, since 1-Oct-1981). Satellite-based Ocean Monitoring System (SATMO). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO, Mexico. Dataset accessed 1/07/2023 at (<https://simar.conabio.gob.mx/explorer/?satmo=nsst>)
- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021. Sea Surface pH (pH) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Dataset accessed 1/07/2023 at (<https://simar.conabio.gob.mx/explorer/?satmo=pH>)
- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021. Dissolved Phosphate on the sea surface (PO₄) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Dataset accessed at <https://simar.conabio.gob.mx>.
- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021b. Dissolved Nitrate on the sea surface (NO₃) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Dataset accessed at <https://simar.conabio.gob.mx>.
- CNH. (2023). Base Nacional de Campos Petroleros. Retrieved from <https://campos.hidrocarburos.gob.mx/>
- CGC. (2020). Seguro paramétrico contra huracanes ayudará a cubrir daños en arrecifes provocados por "Delta." <https://cgc.qroo.gob.mx/seguro-parametrico-contra-huracanes-ayudara-a-cubrir-danos-en-arrecifes-provocados-por-delta/>. Coordinación General de Comunicación, Gobierno de Quintana Roo.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Tussenbroek, B. I. Van, Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., Monroy-Velázquez, L. V., Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Challenges and Opportunities. *Water*, 12(2908). <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Cervino, J., Goreau, T. J., Nagelkerken, I., Smith, G. W., & Hayes, R. (2001). Yellow band and dark spot syndromes in Caribbean corals: distribution, rate of spread, cytology, and effects

- on abundance and division rate of zooxanthellae. *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases*, 53–63.
- Chollett, I., Enríquez, S., & Mumby, P. J. (2014). Redefining Thermal Regimes to Design Reserves for Coral Reefs in the Face of Climate Change. *Plos One*, 9(10), e110634. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110634>
- CONANP-GIZ (2017). Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y Área de Protección de Flora y Fauna Isla Cozumel. Ciudad de México: CONANP-GIZ
- CONAPESCA. (2022). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*. Consultado el 1 de julio de 2023 en <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>
- CONAPRED, (2020). A 15 años de los huracanes Stan y Wilma www.gob.mx/cenapred/articulos/a-quince-anos-de-los-huracanes-stan-y-wilma?idiom=es
- Contreras-Silva, A. I., Tilstra, A., Migani, V., Thiel, A., Pérez-Cervantes, E., Estrada-Saldívar, N., Elias-Ilosvay, X., Mott, C., Álvarez-Filip, L., & Wild, C. (2020). A meta-analysis to assess long-term spatiotemporal changes of benthic coral and macroalgae cover in the Mexican Caribbean. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65801-8>
- Côté, I. M., Gill, J. A., Gardner, T. A., & Watkinson, A. R. (2005). Measuring coral reef decline through meta-analyses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 360(February), 385–395. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1591>
- D'Angelo, C., & Wiedenmann, J. (2014). Impacts of nutrient enrichment on coral reefs: New perspectives and implications for coastal management and reef survival. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7(2), 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.029>
- DATATUR. (2023). Análisis integral del turismo en Quintana Roo. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF/ITxEF_QROO.aspx
- Dixon, A. M., Forster, P. M., Heron, S. F., Stoner, A. M. K., & Beger, M. (2022). Future loss of local-scale thermal refugia in coral reef ecosystems. *PLOS Climate*, 1(2), e0000004. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000004>
- DOF. (1998). *Programa de Manejo del Área Natural Protegida Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel*. 166. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/30_libro_pm.pdf
- El Universal. (2014, septiembre 1). Encalla embarcación en Puerto Morelos daña arrecife de Q. Roo. Retrieved from <https://archivo.eluniversal.com.mx/estados/2014/embarcacion-puerto-morelos-arrecife-1034790.html>
- Eakin, C. M., Morgan, J. A., Heron, S. F., Smith, T. B., Liu, G., Álvarez-Filip, L., Baca, B., Bartels, E., Bastidas, C., Bouchon, C., Brandt, M. E., Bruckner, A. W., Bunkley-Williams, L., Cameron, A., Causey, B. D., Chiappone, M., Christensen, T. R. L., Crabbe, M. J. C., Day, O., ... Yusuf,

- Y. (2010). Caribbean corals in crisis: Record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLoS ONE*, 5(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>
- Ellis, J. I., Jamil, T., Anlauf, H., Coker, D. J., Curdia, J., Hewitt, J., Jones, B. H., Krokos, G., Kürten, B., Hariprasad, D., Roth, F., Carvalho, S., & Hoteit, I. (2019). Multiple stressor effects on coral reef ecosystems. *Global Change Biology*, 25(12), 4131–4146. <https://doi.org/10.1111/gcb.14819>
- Estrada-Saldívar, N., Molina-Hernández, A., Pérez-Cervantes, E., Medellín-Maldonado, F., González-Barrios, F. J., & Álvarez-Filip, L. (2020). Reef-scale impacts of the stony coral tissue loss disease outbreak. *Coral Reefs*. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01949-z>
- Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Navarro-Espinoza, E., SecairaFajardo, F. y Álvarez-Filip, L. (2022). Efectos del Huracán Delta en los arrecifes del Norte de Quintana Roo, UNAM-The Nature Conservancy.
- Estrada-Saldívar, N., Quiroga-García, B. A., Pérez-Cervantes, E., Rivera-Garibay, O. O., & Álvarez-Filip, L. (2021). Effects of the Stony Coral Tissue Loss Disease Outbreak on Coral Communities and the Benthic Composition of Cozumel Reefs. *Frontiers in Marine Science*, 8(March), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.632777>
- Favoretto, F., Mascareñas-Osorio, I., León-Deniz, L., González-Salas, C., Pérez-España, H., Rivera-Higueras, M., Ruiz-Zárate, M. Á., Vega-Zepeda, A., Villegas-Hernández, H., & Aburto-Oropeza, O. (2020). Being Isolated and Protected Is Better Than Just Being Isolated: A Case Study from the Alacranes Reef, Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 7(November), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.583056>
- Fine, M., Cinar, M., Voolstra, C. R., Safa, A., Rinkevich, B., Laffoley, D., Hilmi, N., & Allemand, D. (2019). Coral reefs of the Red Sea — Challenges and potential solutions. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.100498>
- Forrester, G. E., Flynn, R. L., Forrester, L. M., & Jarecki, L. L. (2015). Episodic disturbance from boat anchoring is a major contributor to, but does not alter the trajectory of, long-term coral reef decline. *PLoS ONE*, 10(12), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144498>
- García, N., Marin, R., Méndez, K., and Bitrán, D. (2006). Características e impacto socioeconómico de los huracanes Stan y Wilma en la República Mexicana en el 2005, Centro Nacional de Prevención de Desastres/Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, México, 325 pp
- Gardner, T. A., Côté, I. M., Gill, J. A., Grant, A., & Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301(5635), 958–960. <https://doi.org/10.1126/science.1086050>
- Gardner, T. A., Gill, J. a, Grant, A., Watkinson, a R., & Côté, I. M. (2005). Hurricanes and Caribbean coral reefs: immediate impacts, recovery trajectories and contribution to long-term decline. *Ecology*, 86(1), 174–184. <https://doi.org/10.1890/04-0141>

- Gil-Agudelo, D. L., Cintra-buenrostro, C. E., Brenner, J., González-díaz, P., Kiene, W., Lustic, C., & Pérez-españa, H. (2020). *Coral Reefs in the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem: Conservation Status, Challenges, and Opportunities*. 6(January), 1–20.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00807>
- Gil-Agudelo DL, Smith GW, Garzón-Ferreira J, Weil E, Petersen D. 2004. Dark Spots Disease and Yellow Band Disease, Two Poorly Known Coral Diseases with High Incidence in Caribbean Reefs. In: Rosenberg E, Loya Y, eds. *Coral Health and Disease*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gladfelter, W. B. (1982). White-band disease in *Acropora palmata*: implications for the structure and growth of shallow reefs. *Bulletin of Marine Science*, 32(2), 639–643.
- Glynn, P. W. (1996). Coral reef bleaching: facts, hypotheses, and implications. *Global Change Biology*, 2(6), 495–509. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00063.x>
- Glynn, P. W., & D'Croz, L. (1990). Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño-coincident coral mortality. *Coral Reefs*, 8(4), 181–191.
<https://doi.org/10.1007/BF00265009>
- González-Barrios, F. J., & Alvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators*, 95(April), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.038>
- González-Barrios, F. J., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Secaira-Fajardo, F., & Álvarez-Filip, L. (2023). Legacy effects of anthropogenic disturbances modulate dynamics in the world's coral reefs. *Global Change Biology, March* 1–19.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16686>
- Graham, N. A. J., & Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315–326. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0984-y>
- Harvell, C. D., Jordán-Dahlgren, E., Merkel, S., Rosenberg, E., Raymundo, L., Smith, G., Weil, E., & Willis, B. L. (2007). Coral diseases, Environmental drivers and the balance between corals and microbial associates. *Oceanography*, 20(1), 172–195.
- Hernández-Landa, R. C. (2004). Variación espacial de la cobertura de corales escleractineos y descripción de condición arrecifal a lo largo del Caribe mexicano y un arrecife del Banco de Campeche (Doctoral dissertation, Tesis de maestría. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Unidad Mérida, Mérida).
- Hernández-Torralba, E., Valdepeña-Alvarez, L. A., & Hernández-Hernández, A. T. (2005). Caracterización del arrecife Cayo Arenas en época de secas (primavera) 2004. *SEMAR*, 72.
- Highsmith, R. C., Riggs, A. C., & D'Antonio, C. M. (1980). Survival of hurricane-generated coral fragments and a disturbance model of reef calcification/growth rates. *Oecologia*, 46(3), 322–329. <https://doi.org/10.1007/BF00346259>

- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching, and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839–866.
<https://doi.org/10.1071/MF99078>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., Babcock, R. C., Beger, M., Bellwood, D. R., Berkelmans, R., Bridge, T. C., Butler, I. R., Byrne, M., Cantin, N. E., Comeau, S., Connolly, S. R., Cumming, G. S., Dalton, S. J., Diaz-Pulido, G., ... Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373–377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S., & Torda, G. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Chase, T. J., Dietzel, A., Hill, T., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Jacobson, M., Kerswell, A., Madin, J. S., Mieog, A., Paley, A. S., Pratchett, M. S., Torda, G., & Woods, R. M. (2019). Global warming impairs stock–recruitment dynamics of corals. *Nature*, 568(7752), 387–390.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1081-y>
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. En M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, & C. E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 7–22). Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>
- INEGI. (2023). México en Cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>
- Jackson, J. B. C., Donovan, M. K., Cramer, K. L., Lam, V., & Lam, W. (2014). Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970–2012. *Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland*, 306.
- Jernelöv, A., & Lindén, O. (1981). Ixtoc I: A Case Study of the World's Largest Oil Spill. *Ambio*, 10(6), 299–306.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Jones, R., Bessell-Browne, P., Fisher, R., Klonowski, W., & Slivkoff, M. (2016). Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 9–29.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.049>
- Jordán-Dahlgren, E. 1997. El arrecife coralino de Cayo Arcas. Evaluación de la comunidad coralina. Convenio: “Actualización de la morfometría y la hidrodinámica del arrecife Cayo Arcas y de los riesgos ambientales asociados a la operación del PEP”, PEMEX-ICMyL, UNAM. 93 pp.

- Jordán-Dahlgren, E. 2002. Condición de la comunidad coralina del arrecife de Cayo Arcas. Convenio PEMEX-ICMyL, UNAM. 115 pp.
- Jordán-Dahlgren, E. (2004). Coral reefs of the Gulf of Mexico: characterization and diagnosis. In K. Withers & M. Nipper (Eds.), *Environmental Analysis of the Gulf of Mexico* (pp. 340–350). Corpus Christi, TX: Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. En M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, & C. E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 7–22). Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>
- Kennedy, E. V, Vercelloni, J., Neal, B. P., Ambariyanto, Bryant, D. E. P., Ganase, A., Gartrell, P., Brown, K., Kim, C. J. S., Hudatwi, M., Hadi, A., Prabowo, A., Prihatinningsih, P., Haryanta, S., Markey, K., Green, S., Dalton, P., Lopez-Marcano, S., Rodriguez-Ramirez, A., ... Hoegh-Guldberg, O. (2020). Coral reef community changes in Karimunjawa National Park, Indonesia: Assessing the efficacy of management in the face of local and global stressors. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 1–27. <https://doi.org/10.3390/jmse8100760>
- Kleypas, J. A., McManu, J. W., & Mene, L. A. B. (1999). Environmental limits to coral reef development: Where do we draw the line? *American Zoologist*, 39(1), 146–159. <https://doi.org/10.1093/icb/39.1.146>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck, C. J. (2018). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4, NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/doi.org/10.25921/82ty-9e16>
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., & Neumann, C. J. (2010). The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), 363–376. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Knutson, T. (2023). Global Warming and Hurricanes. Retrieved July 1, 2023, from <https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>.
- Kramer, P. A. (2003). Synthesis of Coral Reef Health Indicators for the. Pp.1-55 in J.C. Lang (Ed.), *Status of Coral Reefs in the Western Atlantic: Results of Initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program*. Atoll Research Bulletin 496., 1-55 pp.
- Kramer, P. R., Roth, L., & Lang, J. (2019). Map of Stony Coral Tissue Loss Disease Outbreak in the Caribbean. www.agrra.org. ArcGIS Online
- Liu, G., Heron, S. F., Mark Eakin, C., Muller-Karger, F. E., Vega-Rodriguez, M., Guild, L. S., de la Cour, J. L., Geiger, E. F., Skirving, W. J., Burgess, T. F. R., Strong, A. E., Harris, A., Maturi, E., Ignatov, A., Sapper, J., Li, J., & Lynds, S. (2014). Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: New 5-km global products from NOAA coral reef watch. *Remote Sensing*, 6(11), 11579–11606. <https://doi.org/10.3390/rs6111579>

- López, O. (2020, junio 14). Daños por encallamiento se pudieron prever. POR ESTO! Retrieved from <https://www.porestto.net/quintana-roo/2020/6/15/danos-por-encallamiento-se-pudieron-prever-212833.html>
- Lowe, R. J., Falter, J. L., Bandet, M. D., Pawlak, G., Atkinson, M. J., Monismith, S. G., & Koseff, J. R. (2005). Spectral wave dissipation over a barrier reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(4), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2004JC002711>
- Loya, Y. (2004). The Coral Reefs of Eilat — Past, Present and Future: Three Decades of Coral Community Structure Studies. *Coral Health and Disease*, 1–34. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06414-6_1
- Madden, I. A., Mariwala, A., Lindhart, M., Narayan, S., Arkema, K. K., Beck, M. W., Baker, J. W., & Suckale, J. (2023). Quantifying the fragility of coral reefs to hurricane impacts: a case study of the Florida Keys and Puerto Rico. *Environmental Research Letters*, 18(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb451>
- Madin, J. S., & Connolly, S. R. (2006). Ecological consequences of major hydrodynamic disturbances on coral reefs. *Nature*, 444(7118), 477–480. <https://doi.org/10.1038/nature05328>
- Magris, R. A. (2018). *Cumulative Human Impacts on Coral Reefs: Assessing Risk and Management Implications for Brazilian Coral Reefs*. 1–14. <https://doi.org/10.3390/d10020026>
- Majumdar, S. D., Hazra, S., Giri, S., Chanda, A., Gupta, K., Mukhopadhyay, A., & Roy, S. D. (2018). Threats to coral reef diversity of Andaman Islands, India: A review. In *Regional Studies in Marine Science* (Vol. 24, pp. 237–250). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.08.011>
- Martoccia, H. (2007, septiembre 4). Destruye un barco 20 mil m2 de corales en QR. La Jornada. Retrieved from <https://www.jornada.com.mx/2007/09/05/index.php?section=estados&article=036n3est>
- Maynard, J. A., Van Hooideonk, R., Eakin, C. M., Puotinen, M., Garren, M., Williams, G. J., Heron, S. F., Lamb, J., Weil, E., Willis, B., & Harvell, C. D. (2015). Projections of climate conditions that increase coral disease susceptibility and pathogen abundance and virulence. *Nature Climate Change*, 5(7), 688–694. <https://doi.org/10.1038/nclimate2625>
- MEA. 2005. Ecosystems and human well-being. Millennium Ecosystem Assessment. OECD. 2012. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. The Organisation for Economic Co-operation and Development
- McField, M., Soto, M., Giro, A., Drysdale, I., Guerrero, C., Rueda, M., Kramer, P., Canty, S., & Muñiz, I. (2022). 2022 Mesoamerican Reef Report Card. www.healthyreefs.org
- McClanahan, T. R. (2022). Coral responses to climate change exposure. *Environmental Research Letters*, 17(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7478>
- Molina-Hernández, A., González-Barrios, F. J., Perry, C. T., & Álvarez-Filip, L. (2020). Two decades of carbonate budget change on shifted coral reef assemblages: Are these reefs being locked into low net budget states? *Caribbean reefs carbonate budget trends*.

- Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 287(1940).
<https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2305>
- Monismith, S. G., Rogers, J. S., Koweeck, D., & Dunbar, R. B. (2015). Frictional wave dissipation on a remarkably rough reef. *Geophysical Research Letters*, 42(10), 4063–4071.
<https://doi.org/10.1002/2015GL063804>
- Mumby, P. J. (1999). Bleaching and hurricane disturbances to populations of coral recruits in Belize. *Marine Ecology Progress Series*, 190, 27–35.
<https://doi.org/10.3354/meps190027>
- Mumby, P. J., Chollett, I., Bozec, Y.-M. M., & Wolff, N. H. (2014). Ecological resilience, robustness, and vulnerability: How do these concepts benefit ecosystem management? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 22–27.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.021>
- Muñiz-Castillo, A. I., Rivera-Sosa, A., Chollett, I., Eakin, C. M., Andrade-Gómez, L., McField, M., & Arias-González, J. E. (2019). Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delineation to enhance conservation. *Scientific Reports*, 9(1), 11013. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47307-0>
- Muñiz-Castillo, A. I., & Arias-González, J. E. (2021). Drivers of coral bleaching in a Marine Protected Area of the Southern Gulf of Mexico during the 2015 event. *Marine Pollution Bulletin*, 166(November 2020), 112256. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112256>
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wessenbeeck, B., Pontee, N., & Burks-Copes, K. A. (2016). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defenses. *PloS one*, 11(5), e0154735.
- Nyström, M. (2006). Redundancy and response diversity of functional groups: Implications for the resilience of coral reefs. *Ambio*, 35(1), 30–35. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-35.1.30>
- Nyström, M., Folke, C., & Moberg, F. (2000). Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology and Evolution*, 15(10), 413–417.
[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01948-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01948-0)
- Ortegon-Aznar, I., González-Vazquez, J. D., Tuz Sulub, A., & Aquilar Perera, A. (2012). Cambio de Fase Alga - coral en el Parque Nacional Arrecife Alacranes, México: Una Aproximación por Grupos Funcionales. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 65, 136–139.
- Ortegón-Aznar, I., Rosado-Espinosa, A., Arjona-Massa, A., & Aguilar-Perera, A. (2011). La marea roja en la costa norte de la Península de Yucatán. *Bioagrociencias*, 4(2), 32–38.
- Ortiz, D. M., & Tissot, B. N. (2012). Evaluating ontogenetic patterns of habitat use by reef fish in relation to the effectiveness of marine protected areas in West Hawaii. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 432, 83–93.
- PEMEX. (2007). *Desarrollo Sustentable 2007*.
- PEMEX. (2021). *Informe de Sustentabilidad de 2021*.

- PEMEX. (2023a). Informes.
https://www.pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Paginas/informes.aspx
- PEMEX. (2023b). Aclara PEMEX sobre el control de fuga en los campos Ek Balam.
https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_nacionales/Paginas/2023_27-nacional.aspx
- Perera, A. A., Landa, R. H., Puerto, L. Q., Cantón, C. C. G., & Doyle, E. (2017). *Rapid Resilience Assessment Protocol Reveals Good Coral Reef Conditions in the Parque Nacional Arrecife Alacranes, off the Northern Yucatán Peninsula, Mexico* *Protocolo de Evaluación de Resiliencia Rápida Revela Buenas Condiciones del Arrecife Coralino e*. December.
- Pérez-Cervantes, E., Estrada-Saldivar, N., Navarro-Espinoza, E., Espinosa-Andrade, N., Melo-Merino, S. M., Rivas-Soto, M., & Álvarez-Filip, L. (2017). Estado de conservación de los arrecifes de coral. GreenPeace, November, 1–25.
- Pérez-Cervantes, E., Estrada-Saldivar, N., Navarro-Espinoza, E., & Espinosa-Andrade, N. (2017). Estado de conservación de los arrecifes de coral de la Península de Yucatán. November, 4. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16755.63526>
- Pérez-Cervantes, E., Pardo-Urrutia, F., Álvarez-Filip, L., Secaira-Fajardo, F., Ruíz-Alvarado, C., & Alvarez-Rocha, M. (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*.
- Precht, W. F., Gintert, B. E., Robbart, M. L., Fura, R., & van Woesik, R. (2016). Unprecedented Disease-Related Coral Mortality in Southeastern Florida. *Scientific Reports*, 6, 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep31374>
- PROFEPA. (2012). RESOLUCIÓN DE COMITÉ DE INFORMACIÓN N°: 0203/12. Retrieved from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/4674/1/resolucion_0203.pdf
- PROFEPA. (2014). ENCALLA EMBARCACIÓN PESQUERA EN ÁREA NATURAL PROTEGIDA “ARRECIFE ALACRANES. Retrieved August 10, 2023, from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/6705/1/mx/encalla_embarcacion_pesquera_en_area_natural_protegida_
- PROFEPA. (2015a). AFECTÓ 520 M2 ENCALLAMIENTO DE EMBARCACIÓN “EMPACADOR VI” EN ARRECIFE ALACRANES: PROFEPA. Retrieved August 10, 2023, from https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/6773/1/mx.wap/afecto_520_m2_encallamiento_de_embarcacion_“empacador_vi”_en_arrecife_alacranes:_profepa.html
- PROFEPA. (2015b). ENCALLAMIENTO DE EMBARCACIÓN “PESCAMEX XIV” EN ANP ARRECIFE ALACRANES AFECTO 250 M2 DE ARRECIFE. Retrieved August 10, 2023, from https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/7292/1/mx/encallamiento_de_embarcacion_“pescamex_xiv”_en_anp_arrecife_alacranes_afecto_250_m2_de_coral.html
- PROFEPA. (2015c). LIBERADA EMBARCACIÓN ENCALLADA EN ANP PUNTA NIZUC; DAÑO PRELIMINAR EN 191.4 M2 DE ZONA CORALINA: PROFEPA. Retrieved August 10, 2023, from

https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/7008/1/mx.wap/liberada_embarcacion_encallada_en_anp_punta_nizuc_dano_preliminar_en_1914_m2_de_zona_coralina:_profepa.html

- PROFEPA. (2017a). INICIA PROFEPA PROCEDIMIENTO POR ENCALLAMIENTO EN PARQUE NACIONAL ARRECIFE ALACRANES. Retrieved from <https://www.gob.mx/profepa/prensa/inicia-profepa-procedimiento-por-encallamiento-en-parque-nacional-arrecife-alacranes>
- PROFEPA. (2017b). PROFEPA INICIA PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO EN CONTRA DEL PATRÓN Y RESPONSABLE DE LA EMBARCACIÓN “LIPARI” POR ENCALLAR EN ARRECIFE ALACRANES. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-inicia-procedimiento-administrativo-en-contra-del-patron-y-responsable-de-la-embarcacion-lipari-por-encallar-en-arrecife-alacranes>
- PROFEPA. (2018a). INICIA PROFEPA PROCEDIMIENTO POR ENCALLAMIENTO DE EMBARCACIÓN “FALLITO”, EN EL PARQUE NACIONAL ARRECIFE ALACRANES, EN YUCATÁN. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.gob.mx/profepa/prensa/inicia-profepa-procedimiento-por-encallamiento-de-embarcacion-fallito-en-el-parque-nacional-arrecife-alacranes-en-yucatan>
- PROFEPA. (2018b). INVESTIGA PROFEPA ENCALLAMIENTO EN PARQUE NACIONAL ARRECIFE ALACRANES. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.gob.mx/profepa/prensa/investiga-profepa-encallamiento-en-parque-nacional-arrecife-alacranes>
- PROFEPA. (2018c). PROFEPA REALIZA PROSPECCIÓN PARA IDENTIFICAR AFECTACIÓN POR ENCALLAMIENTO EN ARRECIFE DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA BANCO CHINCHORRO, EN Q. ROO. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-realiza-prospeccion-para-identificar-afectacion-por-encallamiento-en-arrecife-del-area-natural-protegida-banco-chinchorro-en-q-roo>
- Randall, C. J., & Van Woesik, R. (2017). Some coral diseases track climate oscillations in the Caribbean. *Scientific Reports*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05763-6>
- Perry CT and Lange ID (2019) ReefBudget Caribbean v2: online resource and methodology. Retrieved from <http://geography.exeter.ac.uk/reefbudget/>
- Raymundo, L., Couch, C., Bruckner, A. W., Harvell, C. D., Work, T. M., Weil, E., Woodley, C. M., Jordán-Dahlgren, E., Willis, B. L., Sato, Y., & Aeby, G. S. (2008). Coral Disease Handbook Guidelines for Assessment, Monitoring and Management. In L. Raymundo, C. Couch, & C. D. Harvell (Eds.), Management. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Coral+Disease+Handbook+Guidelines+for+Assessment+,#0>

- Reguero, B. G., Secaira, F., Toimil, A., Escudero, M., Díaz-Simal, P., Beck, M. W., Silva, R., Storlazzi, C., & Losada, I. J. (2019). The risk reduction benefits of the mesoamerican reef in Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 7(May), 1–21.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00125>
- Rey, W., Mendoza, E. T., Salles, P., Zhang, K., Teng, Y. C., Trejo-Rangel, M. A., & Franklin, G. L. (2019). Hurricane flood risk assessment for the Yucatan and Campeche State coastal area. *Natural Hazards*, 96(3), 1041–1065. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03587-3>
- Reyes-Bonilla, H., Millet-Encalada, M., & Álvarez-Filip, L. (2014). Community structure of scleractinian corals outside protected areas in Cozumel Island, Mexico. *Atoll Research Bulletin*, 601, 1–13. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.601>
- Rioja-Nieto, R., & Álvarez-Filip, L. (2019). Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 140(July 2018), 616–625. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.005>
- Rioja-Nieto, R., & Sheppard, C. (2008). Effects of management strategies on the landscape ecology of a Marine Protected Area. *Ocean & Coastal Management*, 51(5), 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2008.01.009>
- Rodríguez, Y. (2019, julio 23). Encalla barco en Isla Alacranes, en Yucatán. Retrieved from <https://www.eluniversal.com.mx/estados/encalla-barco-en-isla-alacranes-en-yucatan/>
- Ruvacaba, A. (2023, julio 26). En Yucatán, barco encallado en Costa Esmeralda afecta “arrecife de Madagascar.” Retrieved from <https://www.milenio.com/estados/yucatan-barco-encallado-costa-esmeralda-afecta-arrecife>
- Safaie, A., Silbiger, N. J., McClanahan, T. R., Pawlak, G., Barshis, D. J., Hench, J. L., Rogers, J. S., Williams, G. J., & Davis, K. A. (2018). High frequency temperature variability reduces the risk of coral bleaching. *Nature Communications*, 9(1), 1671. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04074-2>
- Scheufen, T., Krämer, W. E., Iglesias-Prieto, R., & Enríquez, S. (2017). Seasonal variation modulates coral sensibility to heat-stress and explains annual changes in coral productivity. *Scientific Reports*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04927-8>
- Schmitter-Soto, J. J., Aguilar-Perera, A., Cruz-Martínez, A., Herrera-Pavón, R. L., Morales-Aranda, A. A., & Cobián-Rojas, D. (2018). Interdecadal trends in composition, density, size, and mean trophic level of fish species and guilds before and after coastal development in the Mexican Caribbean. *Biodiversity and Conservation*, 27(2), 459–474. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1446-1>
- Shaver, E., Courtney, C. A., West, J. M., Maynard, J., Hein, M., Wagner, C., Philibotte, J., MacGowan, P., McLeod, I., Boström-Einarsson, L., Bucchianeri, K., Johnston, L., & Koss, J. (2020). A manager’s guide to coral reef restoration planning and design. 128.
- SEMAR. (2023, enero 8). *MARINA BRINDA APOYO DE CONTENCIÓN POR DERRAME DE HIDROCARBUROS EN YUCALPETÉN, Yucatán*. 1, 1.

- Suchley, A., & Álvarez-Filip, L. (2018). Local human activities limit marine protection efficacy on Caribbean coral reefs. *Conservation Letters*, 11(November 2017), 1–9. <https://doi.org/10.1111/conl.12571>
- Swain, T. D., Vega-Perkins, J. B., Oestreich, W. K., Triebold, C., DuBois, E., Henss, J., Baird, A., Siple, M., Backman, V., & Marcelino, L. (2016). Coral bleaching response index: a new tool to standardize and compare susceptibility to thermal bleaching. *Global Change Biology*, 22(7), 2475–2488. <https://doi.org/10.1111/gcb.13276>
- Taylor, M., & E. Alfaro E. (2005). “Climate of Central America and the Caribbean”. En *Encyclopedia of World Climatology*, editado por J. Oliver. Springer, Netherlands: 183-189.
- Titus, K., O’Connell, L., Matthee, K., & Childress, M. (2022). The Influence of Foureye Butterflyfish (*Chaetodon capistratus*) and Symbiodiniaceae on the Transmission of Stony Coral Tissue Loss Disease. *Frontiers in Marine Science*, 9(March), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.800423>
- Tkachenko, K. (2017). *Coral Reefs in the Face of Ecological Threats of the 21st Century. February*. <https://doi.org/10.1134/S2079086416050091>
- Toribio, L. (2023, Julio 27). Mara Lezama declara a Maya Ka’an zona rural comunitaria con potencial turístico. *Excelsior*. Retrieved from <https://www.excelsior.com.mx/nacional/mara-lezama-declara-a-maya-kaan-zona-rural-comunitaria-con-potencial-turistico/1600095>
- Torruco-Gómez, D., & González-Solis, A. (2012). El sistema arrecifal de Campeche: una visión comparativa. *Biodiversidad En Campeche*, 106–173.
- Tunnel, J. W. (1992). Natural versus human impacts to southern Gulf of Mexico coral reef resources. *Proceedings of the 7th International Coral Reef Symposium*, 1(January 1992), 300–306.
- Turner, N. R., & Renegar, D. A. (2017). Petroleum hydrocarbon toxicity to corals: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.050>
- van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Varillas, A. (2007, junio 7). Evalúan interponer denuncia por daño a arrecifes de Cancún. *El Universal*. Retrieved from <https://archivo.eluniversal.com.mx/notas/429924.html>
- Varillas, A. (2016, julio 18). Barco “Lady Pris” encalla y daña coral en Q. Roo. *El Universal*. Retrieved from <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2016/07/18/barco-lady-pris-encalla-y-dana-coral-en-qroo/>
- Varillas, A. (2023, marzo 20). Por anclaje de buque, denuncian daño a centenas de corales en área natural protegida en Puerto Morelos. *El Universal*. Retrieved from

- <https://www.eluniversal.com.mx/estados/por-ancraje-de-buque-denuncian-dano-a-centenas-de-corales-en-area-natural-protegida-en-puerto-morelos/>
- Vega Thurber, R., Burkepille, D. E., Fuchs, C., Shantz, A. A., McMinds, R., & Zaneveld, J. R. (2014). Chronic nutrient enrichment increases prevalence and severity of coral disease and bleaching. *Global Change Biology*, 20(2), 544–554. <https://doi.org/10.1111/gcb.12450>
- W Radio. (2008). Valora Profepa daños por encallamiento de barco en arrecife de Cancún. Retrieved August 10, 2023, from https://wradio.com.mx/radio/2008/04/29/nacional/1209526680_587626.html
- Weil, E. (2004). Coral Reef Diseases in the Wider Caribbean. In E. Rosenberg & Y. Loya (Eds.), *Coral Health and Disease* (pp. 35–68). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06414-6_2
- Wilkinson, C. R. (1999). Global and local threats to coral reef functioning and existence: Review and predictions. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 867–878. <https://doi.org/10.1071/MF99121>
- Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 1023–1034. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13331>
- WorldPop. (2023). Open Spatial Demographic Data and Research. <https://hub.worldpop.org/doi/10.5258/SOTON/WP00660>
- Yucatán. (2016). Sin daños ambientales por encallamiento de barco en arrecife Triángulos. Retrieved August 10, 2023, from La Revista Peninsular website: <https://www.larevista.com.mx/yucatan/sin-danos-ambientales-por-encallamiento-de-barco-en-arrecife-triangulos-4809>
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Romero-Galvanovskis, E., Lagunas Modesto, M. L., & Osorio-Tai, M. E. (2012). *Reconstrucción de la concentración de petróleo proveniente del derrame ocasionado por el accidente de la plataforma de British Petroleum en el Golfo de México ocurrido en 2010 (Aguas superficiales) Informe*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/396848/CGACC_CCA-UNAM_Modelacion_Aguas_Profundas.pdf

IX. Anexo 1 Indicadores climatológicos recabados de las boyas oceanográficas del SIMAR de la CONABIO

Los registros más bajos de temperatura son de 21°C-22°C en el Golfo de México, mientras que en la zona del Caribe mexicano la temperatura mínima ronda alrededor de los 24°C-25°C (Fig. 61). En cambio, las temperaturas máximas rondan entre los 30.2°C y 30.8°C, y el arrecife Alacranes es el sitio que ha presentado la mayor temperatura. El pH superficial del mar ronda alrededor de 8.03-8.08 en los últimos 30 años (Fig. 62). En cuanto al fosfato disuelto en la superficie marina, se observa que la gran mayoría de las zonas presentan valores similares con una tendencia al aumento en los últimos años (Fig. 63). Ciudad del Carmen, la Laguna de Términos y Chetumal son las zonas que presentan mayores valores de nitrato disuelto en la superficie, pero se puede observar que Cancún y Puerto Morelos presentan un aumento en estos valores en los últimos años (Fig. 64).

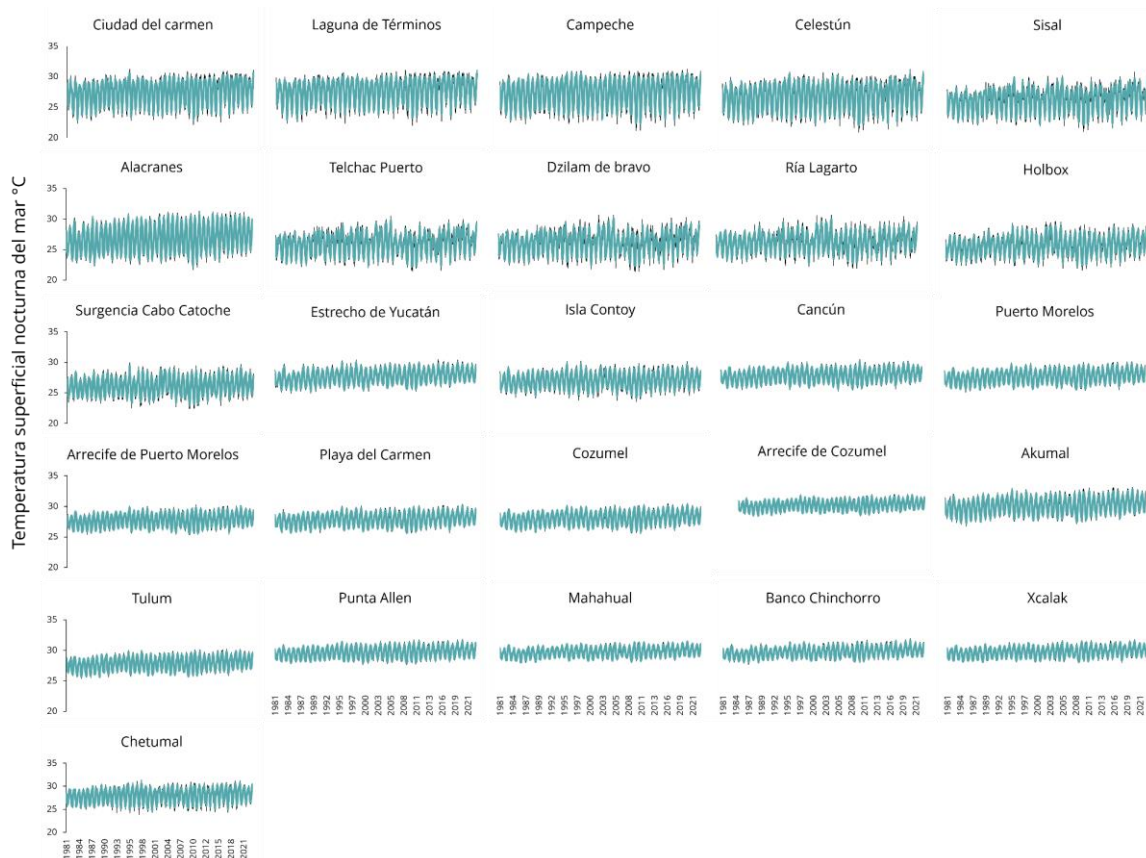


FIGURA 61. PROMEDIO MENSUAL DE 1981-2023 DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL NOCTURNA DEL MAR PARA LAS 26 BOYAS OCEANOGRÁFICAS DE SIMAR

Fuente: Cerdeira-Estrada, S., R. Martell-Dubois, J. Valdéz, R. Ressler. 2020. Daily nighttime Sea Surface Temperature (NSST) (L4-blended, daily, 1-km, since 1-Oct-1981). Satellite-based Ocean Monitoring System (SATMO). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO, Mexico. Acceso a base de datos el [1/07/2023] en (<https://simar.conabio.gob.mx/explorer/?satmo=nsst>).

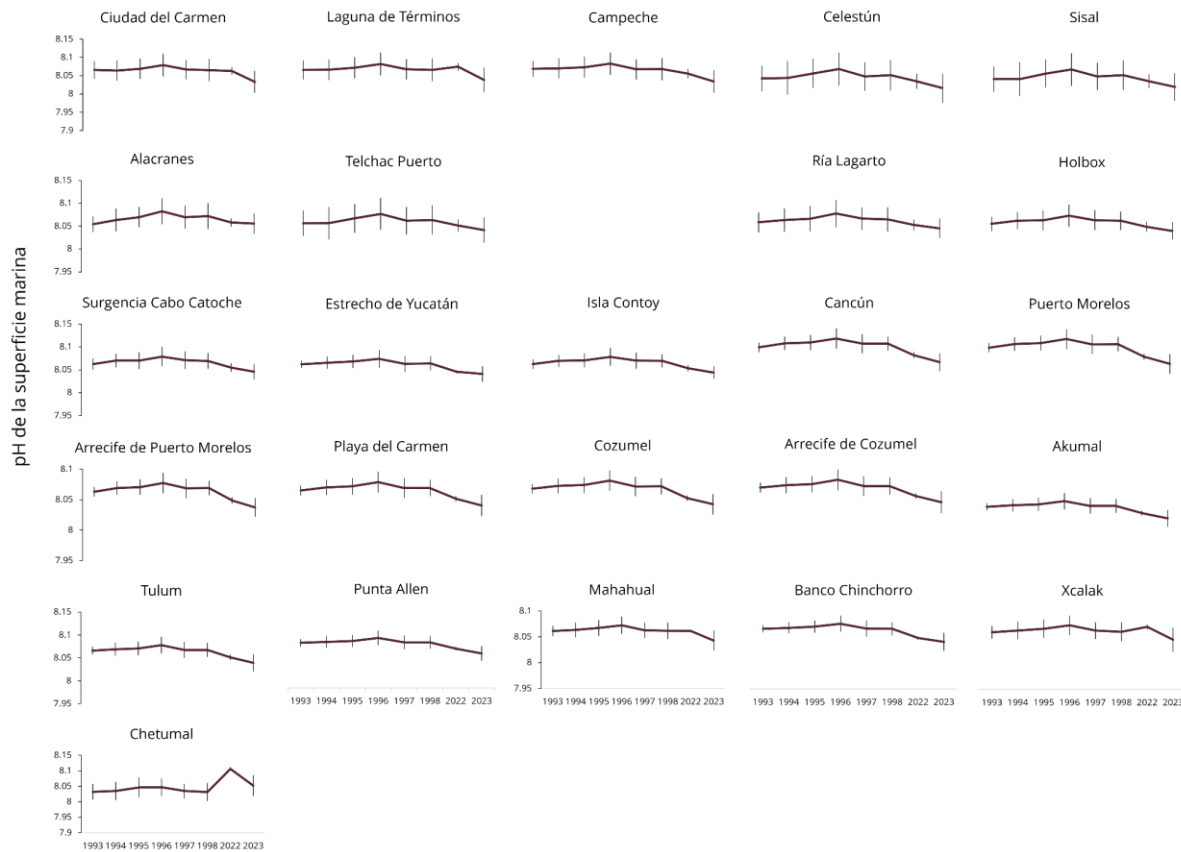


FIGURA 62. PROMEDIO ANUAL DE 1993-1998, 2022-2023 DEL pH SUPERFICIAL DEL MAR PARA 25 BOYAS OCEANOGRÁFICAS DE SIMAR

Fuente: Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarín, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021. Sea Surface pH (pH) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Acceso a base de datos el [1/07/2023] en (<https://simar.conabio.gob.mx/explorer/?satmo=pH>).

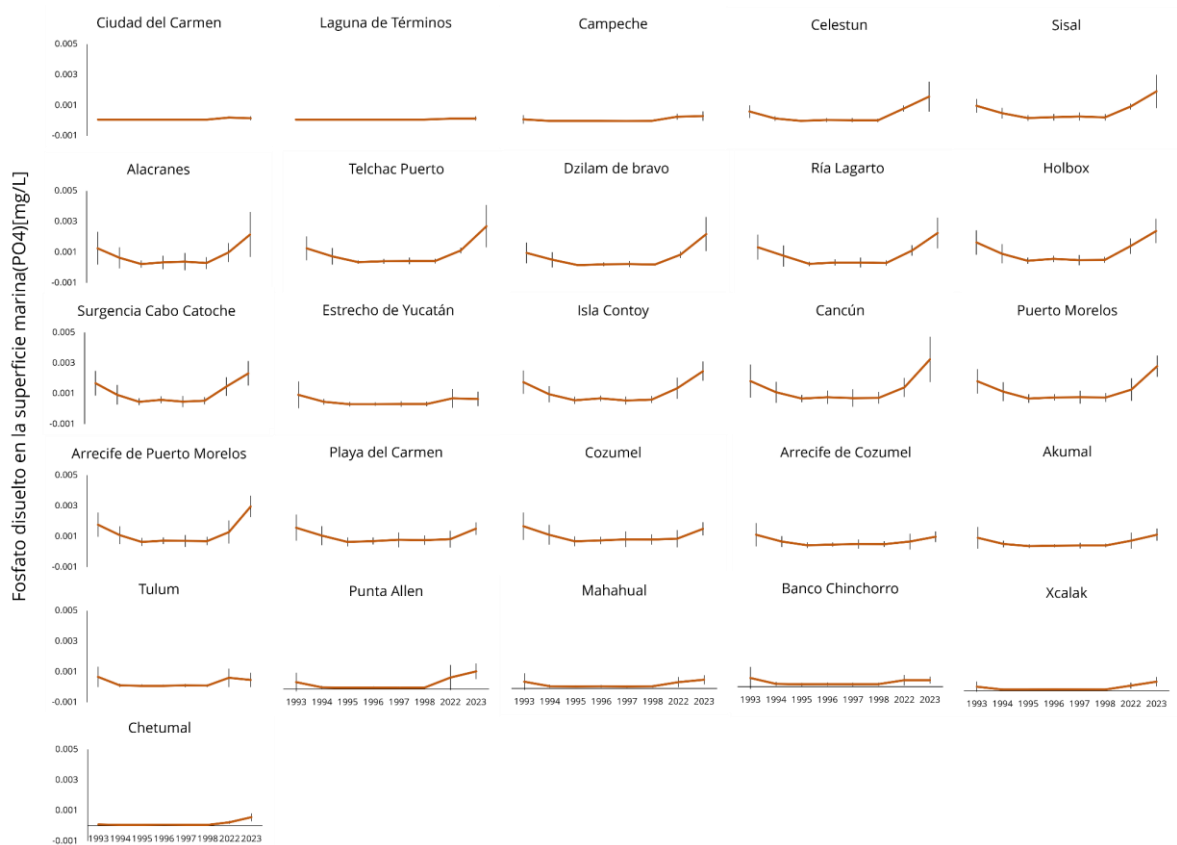


FIGURA 63. PROMEDIO ANUAL DE 1993-1998, 2022-2023 DEL FOSFATO DISUELTO EN LA SUPERFICIE MARINA (PO₄) [MG/L] PARA 26 BOYAS OCEANOGRÁFICAS DE SIMAR

Fuente: Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021. Dissolved Phosphate on the sea surface (PO₄) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Acceso a base de datos el [1/07/2023] en (<https://simar.conabio.gob.mx>).



FIGURA 64. PROMEDIO ANUAL DE 1993-1998, 2022-2023 DE NITRATO DISUELTO EN LA SUPERFICIE MARINA (NO₃) [MG/L] PARA 26 BOYAS OCEANOGRÁFICAS DE SIMAR

Fuente: Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarín, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., Caballero-Aragón, H., C., R. Ressler. 2021. Dissolved Nitrate on the sea surface (NO₃) at 1 km. Ocean-Atmosphere Climate Model System (SIMOD). Marine-Coastal Information and Analysis System (SIMAR). CONABIO. México. Acceso a base de datos el [1/07/2023] en (<https://simar.conabio.gob.mx>).

X. Anexo 2 Lista de participantes invitados a responder el cuestionario sobre percepción de amenazas

No.	Nombre	Método de contacto	Institución	Contestó la encuesta
1	CRISTÓBAL ENRIQUE CÁCERES G. CANTÓN	Correo	PN ARRECIFE ALACRANES	no
2	María del Carmen García Rivas	Correo	PN Arrecife de Puerto Morelos	sí
3	Blanca Alicia Quiroga García	Correo	PN Arrecifes Cozumel	sí
4	Felipe Ángel Omar Ortiz Moreno	Correo	RB Arrecifes de Sian Ka'an	no
5	Denisse Ángeles Solís	Correo	PN Arrecifes de Xcalak y RB Banco Chinchorro	no
6	José Juan Domínguez Calderón	Correo	RB Caribe Mexicano y PN Isla Contoy	no
7	José Arturo González González	Correo	PN Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	no
8	ENRIQUE LOZANO ALVAREZ	Correo	UASA, UNAM	sí
9	FERNANDO NEGRETE SOTO	Correo	UASA, UNAM	sí
10	PATRICIA BRIONES FOURZÁN	Correo	UASA, UNAM	no
11	CECILIA BARRADAS ORTÍZ	Correo	UASA, UNAM	no
12	SUSANA ENRÍQUEZ DOMÍNGUEZ	Correo	UASA, UNAM	no
13	ANASTAZIA T. BANASZAK	Correo	UASA, UNAM	sí
14	ERIC JORDAN DAHLGREN	Correo	UASA, UNAM	sí
15	M.EN C. ROSA ELISA RODRÍGUEZ	Correo	UASA, UNAM	sí
16	PAUL ANDREW BLANCHON	Correo	UASA, UNAM	no
17	PATRICIA E. THOME ORTÍZ	Correo	UASA, UNAM	sí
18	BRIGITTA VAN TUSSENBROEK	Correo	UASA, UNAM	no

No.	Nombre	Método de contacto	Institución	Contestó la encuesta
19	JUAN PABLO CARRICART	Correo	UASA, UNAM	sí
20	LORENZO ALVAREZ FILIP	Correo	UASA, UNAM	sí
21	VIVIANNE SOLÍS WEISS	Correo	UASA, UNAM	no
22	Ernesto Arias	Correo	Cinvestav Mérida	no
23	Rodrigo Garza	Correo	Sisal UNAM	sí
24	RODOLFO RIOJA	Correo	Sisal UNAM	sí
25	Roberto Hernández landa	Correo	Sisal UNAM	no
26	Carlos González	Correo	UADY	no
27	Enrique Núñez	Correo	Universidad Autónoma del Carmen	no
28	Daniel Torruco	Correo	Cinvestav Mérida	no
29	Gilberto Acosta	Correo	CICY	no
30	Claudia Padilla	Correo	INAPESCA	no
31	Harold Villegas	Correo	UADY	sí
32	Miguel Ruiz Zárate	Correo	Ecosur	no
33	Nuno Simoes	Correo	Sisal UNAM	no
34	Adán Caballero	Correo	CICY	no
35	Sergio Guillen	Correo	UADY	no
36	Melino soto	Correo	HRI	sí
37	Rosa Loreto	Correo	ASK	sí
38	Sergio Cerdeira Estrada	Correo	CONABIO	no
39	Stuart Fulton	Correo	COBI	no
40	Manuel Dorado Buceo	Correo	Prestador de servicios	sí
41	Martín Lancha	Teléfono	Prestador de servicios	no

No.	Nombre	Método de contacto	Institución	Contestó la encuesta
42	Bucanero	Teléfono	Prestador de servicios	no
43	Guillermo Aldora	Teléfono	Prestador de servicios	no
44	El Teacher	Teléfono	Prestador de servicios	no
45	Clemente Cauch	Correo	Pescador	sí
46	Abel	Correo	Pescador/Prestador	no
47	Miguel Rivas	Correo	Oceana	sí
48	Quetzali Hernández	Correo	SISAL UNAM	no
49	Chencho	Teléfono	Prestador de servicios chinchorro	no
50	Aaron MarAdentro	Teléfono	Prestador de servicios Mahahual	no
51	Héctor Hernández Arana	Correo	Ecosur	no
52	Lic. María del Carmen Morales Pérez	Correo	PN Tulum	no
53	Biol Catalina Galindo de Prince	Correo	Amigos de Isla Contoy	no
54	Johanna Calle Triviño	Correo	Wave of Change Science	no
55	Gabriela Nava	Correo	Oceanus	no
56	Alfonso Aguilar Perera	Correo	UADY	no
57	ILEANA ORTEGÓN-AZNAR	Correo	UADY	sí
58	Pedro Luís Ardisson Herrera	Correo	Cinvestav Mérida	no
59	Ismael Mariño Tapia	Correo	ENES Mérida	no
60	Cristina Cortes	Correo	Corales vivos	no
61	Fernando Secaira	Correo	TNC México	no
62	Baruch Figueroa	Correo	CEA	no
63	Ernesto Hevia	Teléfono	prestador de servicios	no

No.	Nombre	Método de contacto	Institución	Contestó la encuesta
64	Vanessa Francisco	Correo	GIZ	sí
65	Christian Alva	Correo	GIZ	no
66	Bernardo Elías Caamal Madrigal	Correo	PN Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	sí
67	Omar Rivera	Correo	COBI	sí
68	Sara Gutiérrez Plata	Correo	INAPESCA	sí
69	Ana Molina	Correo	CENTINELAS DEL ARRECIFE/UNAM	sí
70	Andrea Marina Sánchez López	Correo	PN Arrecifes Cozumel	sí
71	Víctor Rodríguez Ruano	Correo	Universidad/Centro de Investigación	sí
72	Raúl Enrique Lara Mendoza	Correo	INAPESCA	sí
73	Eduardo Navarro Espinoza	Correo	OCEANUS	sí
74	Sergio M. Camacho	Correo	Organización de la Sociedad Civil	sí
75	Francisco Medellín	Correo	Universidad/Centro de Investigación	sí
76	Santiago Felipe Puch Salazar	Correo	Prestador de servicios	sí
77	JOSÉ FRANCISCO CHÁVEZ VILLEGAS	Correo	INAPESCA	sí
78	Myrna Lilí López Monzalvo	Correo	Consultoría ambiental	sí
79	Gisela Maldonado Saldaña	Correo	GIZ	sí
80	Mauro Azarcoya	Correo	Construcción	sí
81	Gabriela Gutiérrez Estrada	Correo	CENTINELAS DEL ARRECIFE/UNAM	sí
82	Pepe Estrada	Correo	Agencia de Gobierno Municipal, Estatal o Federal	sí

No.	Nombre	Método de contacto	Institución	Contestó la encuesta
83	Fernando Daniel Armengol Martínez	Correo	Universidad/Centro de Investigación	sí
84	Luis Quijano	Correo	Organización de la Sociedad Civil	sí
85	Manuel Olan González	Correo	UASA, UNAM	sí
86	Andrés Irigoyen Solís	Correo	Sector pesquero	sí
87	Nadia Sandoval	Correo	Takata	sí
88	Martha Beatriz Hernández Millán	Correo	Grupo organizado	sí
89	Karen Fuentes	Correo	Organización de la Sociedad Civil	sí
90	Andrea Rivera-Sosa	Correo	Organización de la Sociedad Civil	sí
91	Roberto Carlos Hernández Landa	Correo	Universidad/Centro de Investigación	sí
92	Pedro Pablo Solís Canan	Personal	Sector pesquero	sí
93	Ariel Vázquez Hernández	Personal	Sector pesquero	sí
94	Eliseo Gonzalo Osorio Vidal	Personal	Turismo	sí
95	David Jesús González Vázquez	Correo	Agencia de Gobierno Municipal, Estatal o Federal	sí

XI. Anexo 3 Lista de los 205 sitios utilizados para los análisis del estudio en las diferentes regiones de la Península de Yucatán

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Banco Campeche	Cayo Arenas 1	22.11505	-91.38338	No
Banco Campeche	Cayo Arenas 2	22.11335	-91.37188	No
Banco Campeche	Cayo Arenas 3	22.10949	-91.40057	No
Banco Campeche	Transecto 1	20.21288	-91.9626	No
Banco Campeche	Transecto 10	20.20273	-91.9792	No
Banco Campeche	Transecto 11	20.19524	-91.957	No
Banco Campeche	Transecto 12	20.19653	-91.9595	No
Banco Campeche	Transecto 2	20.2093	-91.96	No
Banco Campeche	Transecto 3	20.20547	-91.9603	No
Banco Campeche	Transecto 4	20.20217	-91.9603	No
Banco Campeche	Transecto 5	20.20084	-91.9619	No
Banco Campeche	Transecto 6	20.2016	-91.9653	No
Banco Campeche	Transecto 7	20.20539	-91.9642	No
Banco Campeche	Transecto 8	20.20986	-91.9642	No
Banco Campeche	Transecto 9	20.20305	-91.9759	No
Banco Campeche	Triángulos Este Centro	20.90648	-92.23033	No
Banco Campeche	Triángulos Este Norte	20.92158	-92.2104	No
Banco Campeche	Triángulos Este Sur	20.90088	-92.23888	No
Banco Campeche	Triángulos Oeste	20.96259	-92.31084	No
Banco Campeche en Yucatán	Alacranes 7	22.505151	-89.796617	No
Banco Campeche en Yucatán	Alacranes Centro	22.50287	-89.79512	No
Banco Campeche en Yucatán	Alacranes Norte	22.58067	-89.75656	No
Banco Campeche en Yucatán	Alacranes Sur	22.38547	-89.6988	No
Banco Campeche en Yucatán	Arcos	22.587133	-89.753317	No
Banco Campeche en Yucatán	Bajos del norte	23.242417	-88.714417	No
Banco Campeche en Yucatán	Bajos del norte 2	23.242433	-88.714417	No
Banco Campeche en Yucatán	Caribbean	22.384533	-89.625483	No
Banco Campeche en Yucatán	Center lagoon	22.4456	-89.6748	No
Banco Campeche en Yucatán	Cordillera	22.39575	-89.706083	No
Banco Campeche en Yucatán	Estadio	23.198917	-88.974133	No
Banco Campeche en Yucatán	Final	23.171183	-88.951301	No
Banco Campeche en Yucatán	Muertos	22.42342	-89.7278	No
Banco Campeche en Yucatán	Norther	22.52908	-89.7938	No

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Banco Campeche en Yucatán	Paso del zorro	23.261683	-88.695417	No
Banco Campeche en Yucatán	Paso del zorro 2	23.261683	-88.695417	No
Banco Campeche en Yucatán	Piedra Ballena	22.567701	-89.779633	No
Banco Campeche en Yucatán	Sardinas	22.505367	-89.795701	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 1	22.38699	-89.6418	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 2	22.54104	-89.7516	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 3	22.5701	-89.7387	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 4	22.50257	-89.7741	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 5	22.45126	-89.6214	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 6	22.4924	-89.6291	No
Banco Campeche en Yucatán	Sitio 7	22.39328	-89.6651	No
Banco Campeche en Yucatán	Souh Leewars	22.37831	-89.6877	No
Banco Campeche en Yucatán	South Winward	22.37282	-89.6545	No
Banco Campeche en Yucatán	Tata y Rafa	22.553851	-89.653701	No
Banco Campeche en Yucatán	Tweed	22.546017	-89.661001	No
Banco Campeche en Yucatán	Vapor	22.539501	-89.654101	No
Banco Chinchorro	CHI01	18.5259	-87.4343	Sí
Banco Chinchorro	CHI02	18.605	-87.24827	Sí
Banco Chinchorro	CHI03	18.41535	-87.41522	No
Banco Chinchorro	CHI04	18.767	-87.33077	Sí
Banco Chinchorro	CHI05	18.40418	-87.39399	Sí
Banco Chinchorro	CHI06	18.45277	-87.4307	No
Banco Chinchorro	CHI07	18.56217	-87.42134	No
Banco Chinchorro	MX1069	18.50408	-87.39521	No
Banco Chinchorro	MX1073	18.71014	-87.34	No
Banco Chinchorro	MX1075	18.44171	-87.43012	Sí
Banco Chinchorro	MX1077	18.46618	-87.31011	No
Banco Chinchorro	MX1083	18.76202	-87.28952	No
Banco Chinchorro	MX1084	18.38258	-87.37376	No
Banco Chinchorro	MX1086	18.43716	-87.42027	No
Banco Chinchorro	MX1089	18.56658	-87.41886	No
Banco Chinchorro	MX1091	18.59363	-87.41572	No
Banco Chinchorro	MX1093	18.67483	-87.23342	No
Banco Chinchorro	MX1096	18.68812	-87.37661	No
Banco Chinchorro	MX1138	18.4095	-87.35062	No
Banco Chinchorro	MX1140	18.41622	-87.41099	No

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Banco Chinchorro	MX1143	18.56988	-87.30076	No
Banco Chinchorro	MX1151	18.55853	-87.29845	No
Banco Chinchorro	MX1152	18.67757	-87.38542	No
Banco Chinchorro	MX1154	18.7707	-87.31096	No
Banco Chinchorro	MX2071	18.60092	-87.34671	No
Banco Chinchorro	MX2072	18.65995	-87.25056	No
Banco Chinchorro	MX2074	18.4195	-87.38292	No
Banco Chinchorro	MX2078	18.54257	-87.42532	Sí
Banco Chinchorro	MX2079	18.59147	-87.25895	No
Banco Chinchorro	MX2080	18.59891	-87.41929	Sí
Banco Chinchorro	MX2081	18.68211	-87.2294	No
Banco Chinchorro	MX2087	18.50803	-87.31285	No
Banco Chinchorro	MX2090	18.61936	-87.2446	No
Banco Chinchorro	MX2145	18.63448	-87.26985	No
Banco Chinchorro	MX3070	18.5938	-87.27295	No
Banco Chinchorro	MX3082	18.75475	-87.34292	Sí
Banco Chinchorro	MX3146	18.75132	-87.33279	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1005	19.75022	-87.40317	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1006	19.82881	-87.4399	Sí
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1008	20.05696	-87.46059	Sí
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1026	19.13004	-87.53735	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1027	19.14709	-87.53444	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1028	19.2395	-87.49639	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1029	19.30663	-87.43373	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1032	19.41375	-87.44505	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1034	19.59147	-87.39506	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1035	19.73968	-87.4135	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1036	19.8112	-87.45447	No

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1037	19.86934	-87.41939	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1040	20.0566	-87.46806	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1042	20.11526	-87.45794	Sí
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1103	19.24261	-87.50754	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1107	19.50236	-87.42566	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1109	19.64721	-87.41732	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1111	19.81865	-87.45071	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX1112	19.8546	-87.43729	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2007	19.83473	-87.44177	Sí
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2033	19.45044	-87.43655	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2102	19.14788	-87.53829	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2104	19.3679	-87.44243	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2110	19.81525	-87.45275	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX2113	19.93345	-87.43873	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX3030	19.36797	-87.42869	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX3039	19.89654	-87.4179	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX3101	19.13635	-87.53831	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX3108	19.61263	-87.40448	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX4158	19.93385	-87.44218	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	MX4159	19.86672	-87.42852	No
Centro Quintana Roo (Sian Ka'an)	Niccehabin	19.74174	-87.41553	No

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Cozumel	CHAN01	20.44066	-87.00212	Sí
Cozumel	COCO02	20.31999	-87.02428	Sí
Cozumel	HANA02	20.50528	-86.7575	No
Cozumel	HANAII	20.499	-86.761	No
Cozumel	ISLO01	20.27033	-86.97508	No
Cozumel	MX1011	20.39518	-86.85793	No
Cozumel	MX1044	20.30105	-86.94475	No
Cozumel	MX1048	20.35842	-87.02822	Sí
Cozumel	MX1053	20.48621	-86.97072	Sí
Cozumel	MX1054	20.59835	-86.72177	No
Cozumel	MX1126	20.50523	-86.76044	Sí
Cozumel	MX2002	20.43995	-86.81503	No
Cozumel	MX2009	20.27663	-86.963	Sí
Cozumel	MX2044	20.3269	-87.0257	No
Cozumel	MX3009	20.27226	-86.99994	Sí
Cozumel	MX3048	20.42958	-87.01366	No
Cozumel	MX3054	20.51116	-86.75259	Sí
Cozumel	MX4156	20.28981	-86.95866	No
Cozumel	MX4160	20.34063	-86.90071	Sí
Cozumel	PAR01	20.47634	-86.97834	Sí
Norte Quintana Roo	Bak 1	20.39426	-87.31238	No
Norte Quintana Roo	Bak 2	20.39279	-87.31472	No
Norte Quintana Roo	BP01	20.35021	-87.33123	No
Norte Quintana Roo	CUEV18	21.16152	-86.7415	Sí
Norte Quintana Roo	DR01	20.25068	-87.3955	No
Norte Quintana Roo	Las Cuevas Deep	20.38383	-87.31589	No
Norte Quintana Roo	Las Cuevas Shallow	20.38337	-87.31515	No
Norte Quintana Roo	Las Redes Deep	20.38358	-87.31145	No
Norte Quintana Roo	Las Redes Shallow	20.38451	-87.31318	No
Norte Quintana Roo	MX1010	20.34824	-87.33246	No
Norte Quintana Roo	MX1012	20.4212	-87.28948	No
Norte Quintana Roo	MX1014	20.50098	-87.21507	Sí
Norte Quintana Roo	MX1017	21.17058	-86.72977	Sí
Norte Quintana Roo	MX1043	20.25862	-87.38535	Sí
Norte Quintana Roo	MX1045	20.38332	-87.31586	No
Norte Quintana Roo	MX1047	20.39043	-87.31046	No

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Norte Quintana Roo	MX1050	20.53629	-87.16451	Sí
Norte Quintana Roo	MX1055	20.58415	-87.10607	Sí
Norte Quintana Roo	MX1057	20.64057	-87.05353	Sí
Norte Quintana Roo	MX1060	20.8548	-86.85945	No
Norte Quintana Roo	MX1060S	20.8548	-86.8594	No
Norte Quintana Roo	MX1061	20.95176	-86.81191	No
Norte Quintana Roo	MX1062	21.00994	-86.77835	No
Norte Quintana Roo	MX1066	21.46045	-86.78122	No
Norte Quintana Roo	MX1116	20.55096	-87.14924	Sí
Norte Quintana Roo	MX1116X	20.55096	-87.1424	No
Norte Quintana Roo	MX1117	20.21802	-87.41907	Sí
Norte Quintana Roo	MX1121	20.41934	-87.29573	No
Norte Quintana Roo	MX1125	20.52197	-87.18737	Sí
Norte Quintana Roo	MX1128	20.63495	-87.05679	No
Norte Quintana Roo	MX1131	20.91631	-86.8288	Sí
Norte Quintana Roo	MX1132	20.98728	-86.79642	Sí
Norte Quintana Roo	MX1133	21.13336	-86.74054	Sí
Norte Quintana Roo	MX1134	21.19862	-86.72548	No
Norte Quintana Roo	MX1137	21.45917	-86.78367	No
Norte Quintana Roo	MX2052	20.48636	-87.23286	Sí
Norte Quintana Roo	MX2063	21.24296	-86.73504	No
Norte Quintana Roo	MX2127	20.62129	-87.07259	No
Norte Quintana Roo	MX3117	20.24278	-87.40218	No
Norte Quintana Roo	MX4157	20.55117	-87.14902	No
Norte Quintana Roo	TACU01	20.2646	-87.38212	Sí
Norte Quintana Roo	Yalku Deep	20.40648	-87.29802	No
Norte Quintana Roo	Yalku Shallow	20.40748	-87.2995	No
Norte Quintana Roo	Yalkuito Deep	20.41583	-87.29389	No
Norte Quintana Roo	Yalkuito Shallow	20.41778	-87.29444	No
Sur Quintana Roo	MAH01	18.66265	-87.71636	Sí
Sur Quintana Roo	MAH034	18.76072	-87.6664	Sí
Sur Quintana Roo	MAHFAR	18.74188	-87.67735	No
Sur Quintana Roo	MX1019	18.56062	-87.73449	No
Sur Quintana Roo	MX1020	18.64969	-87.71769	Sí
Sur Quintana Roo	MX1023	18.82283	-87.65523	No
Sur Quintana Roo	MX1059	18.2088	-87.82293	Sí

Región	Sitio	Latitud	Longitud	Series de tiempo
Sur Quintana Roo	MX1065	18.35314	-87.7907	Sí
Sur Quintana Roo	MX1092	18.62068	-87.7269	No
Sur Quintana Roo	MX1097	18.80595	-87.6611	No
Sur Quintana Roo	MX1136	18.34974	-87.79838	Sí
Sur Quintana Roo	MX1139	18.40495	-87.7673	Sí
Sur Quintana Roo	MX2024	18.91151	-87.62064	No
Sur Quintana Roo	MX2025	19.00404	-87.5788	No
Sur Quintana Roo	MX2067	18.40018	-87.76702	Sí
Sur Quintana Roo	MX2088	18.61549	-87.7289	No
Sur Quintana Roo	MX2100	19.00207	-87.5853	No
Sur Quintana Roo	MX3021	18.78277	-87.65809	Sí
Sur Quintana Roo	MX3099	18.89753	-87.62923	No
Sur Quintana Roo	MX3130	18.28453	-87.8254	No

XII. Anexo 4. Análisis estadísticos Kruskal-Wallis

A continuación, se muestran los resultados de los análisis estadísticos realizados por región y en el tiempo (Fig. 65-80).

data: x and group
Kruskal-Wallis chi-squared = 12.2674, df = 6, p-value = 0.06

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-		Alacranes	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Row Mean							
Banco Ca	-2.223158 0.0688						
Banco Ch	-0.877319 0.4437	1.816594 0.1455					
Central	-0.799700 0.4451	1.622616 0.1832	0.017417 0.4931				
Cozumel	-0.461494 0.3759	2.599337 0.0327	0.648623 0.4520	0.537535 0.4136			
Northern	-0.185868 0.4711	3.322025 0.0094*	1.182615 0.3554	0.960304 0.4422	0.524864 0.3935		
Southern	-0.497350 0.3823	2.747811 0.0315	0.667882 0.4813	0.541745 0.4410	-0.032894 0.5112	-0.635949 0.4239	

alpha = 0.05
Reject Ho if p <= alpha/2

FIGURA 65. COMPARACIÓN DE COBERTURA DE CORAL ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 14.745, df = 6, p-value = 0.02

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-		Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Row Mean							
Banco Ca	0.481179 0.4413						
Banco Ch	0.230875 0.4517	-0.339566 0.4283					
Central	0.149063 0.4628	-0.381161 0.4614	-0.083219 0.4668				
Cozumel	1.959940 0.0875	1.961943 0.1045	2.429330 0.1588	2.172263 0.1044			
Northern	1.852433 0.0840	1.870383 0.0921	2.401643 0.0857	2.088179 0.0966	-0.379513 0.4350		
Southern	1.484197 0.1315	1.332435 0.1599	1.810363 0.0819	1.615546 0.1115	-0.911178 0.2925	-0.667362 0.3784	

FIGURA 66. COMPARACIÓN DE COBERTURA DE MACROALGAS ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 22.8477, df = 6, p-value = 0

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-1.461710 0.1678					
Banco Ch	-0.611097 0.3157	1.149574 0.2022				
Central	0.302134 0.4003	2.099470 0.0537	1.112745 0.1994			
Cozumel	-2.820066 0.0101*	-1.706639 0.1154	-3.081772 0.0072*	-3.834358 0.0013*		
Northern	-1.334699 0.1737	0.451715 0.3600	-0.989162 0.2117	-2.115057 0.0602	2.861228 0.0111*	
Southern	-0.778412 0.2695	1.174694 0.2101	-0.168763 0.4330	-1.396712 0.1706	3.581965 0.0018*	1.067833 0.1999

FIGURA 67. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE HERBÍVOROS ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 13.3015, df = 6, p-value = 0.04

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-1.571358 0.1219					
Banco Ch	-0.187405 0.6876	1.850000 0.1125				
Central	-0.169197 0.6492	1.640837 0.1323	0.005805 0.4977			
Cozumel	-1.609452 0.1254	0.095550 0.5389	-1.998141 0.0960	-1.719610 0.1283		
Northern	-0.104003 0.5665	2.387161 0.0594	0.155899 0.6133	0.122509 0.5923	2.777282 0.0576	
Southern	-0.226056 0.7185	2.117858 0.0897	-0.033176 0.5111	-0.034433 0.5375	2.409387 0.0839	-0.250464 0.7658

FIGURA 68. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE PECES COMERCIALES ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 19.9846, df = 6, p-value = 0

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-2.482585 0.0342					
Banco Ch	-2.626019 0.0302	-0.124967 0.4503				
Central	-2.207579 0.0477	0.172420 0.4531	0.290544 0.4263			
Cozumel	-1.140452 0.1779	2.054244 0.0524	2.282173 0.0472	1.645772 0.0953		
Northern	-0.877592 0.2348	2.752290 0.0311	3.056621 0.0235*	2.196314 0.0421	0.569326 0.3320	
Southern	-1.871061 0.0644	1.226519 0.1777	1.437951 0.1316	0.881016 0.2483	-1.155563 0.1859	-2.039959 0.0482
alpha = 0.05						
Reject Ho if p <= alpha/2						

FIGURA 69. COMPARACIÓN DE RIQUEZA DE ESPECIES ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 19.7982, df = 6, p-value = 0

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-2.268696 0.0408					
Banco Ch	-2.734999 0.0327	-0.552709 0.3585				
Central	-2.183425 0.0435	-0.049525 0.4803	0.450903 0.3423			
Cozumel	-1.236271 0.1748	1.613851 0.1119	2.308308 0.0441	1.496435 0.1284		
Northern	-0.942763 0.2421	2.314007 0.0543	3.140225 0.0177*	2.079026 0.0439	0.632058 0.3461	
Southern	-2.166187 0.0398	0.481986 0.3481	1.178457 0.1790	0.482059 0.3674	-1.483440 0.1207	-2.506521 0.0427
alpha = 0.05						

FIGURA 70. COMPARACIÓN DEL N1 DE HILL ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 16.8042, df = 6, p-value = 0.01

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-2.366781 0.0377					
Banco Ch	-2.824602 0.0497	-0.539137 0.3871				
Central	-2.278691 0.0397	-0.052748 0.5029	0.435273 0.4097			
Cozumel	-1.476807 0.1334	1.388502 0.1444	2.045285 0.0612	1.301947 0.1447		
Northern	-1.368171 0.1383	1.771478 0.0892	2.520439 0.0410	1.619756 0.1105	0.295383 0.4478	
Southern	-2.650926 0.0421	-0.059764 0.5263	0.588204 0.3895	0.007954 0.4968	-1.804280 0.0934	-2.426495 0.0400

alpha = 0.05

FIGURA 71. COMPARACIÓN DEL N2 DE HILL ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 14.288, df = 6, p-value = 0.03

Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)						
Col Mean- Row Mean	Alacrane	Banco Ca	Banco Ch	Central	Cozumel	Northern
Banco Ca	-2.116434 0.0720					
Banco Ch	-0.336782 0.4832	2.381370 0.0453				
Central	-0.535785 0.4782	1.826000 0.1187	-0.286411 0.4518			
Cozumel	0.341826 0.5127	3.534787 0.0043*	0.982944 0.4274	1.149616 0.3755		
Northern	-0.082816 0.4670	3.297047 0.0051*	0.436730 0.4967	0.695410 0.4647	-0.772376 0.4619	
Southern	-0.153323 0.4853	3.064113 0.0076*	0.311562 0.4666	0.584873 0.4888	-0.848619 0.4621	-0.145613 0.4642

FIGURA 72. COMPARACIÓN DEL IFA ENTRE LAS DISTINTAS REGIONES.

Kruskal-Wallis chi-squared = 28.0605, df = 6, p-value = 0

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-	Row Mean	2006	2009	2012	2014	2016	2018
2009		-2.554915 0.0186*					
2012		-1.830492 0.0784	0.986727 0.2125				
2014		-1.558259 0.1043	1.292991 0.1470	0.331590 0.3886			
2016		-4.044045 0.0003*	-0.436766 0.3660	-1.785049 0.0780	-2.235032 0.0334		
2018		-4.199333 0.0003*	-1.110126 0.1869	-2.346510 0.0284	-2.729953 0.0166*	-0.883743 0.2328	
2021		-1.646612 0.0951	1.441530 0.1207	0.449133 0.3811	0.092551 0.4631	2.573112 0.0212*	3.003191 0.0094*

FIGURA 73. COMPARACIÓN DE COBERTURA DE CORAL EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 25.9088, df = 6, p-value = 0

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-	Row Mean	2006	2009	2012	2014	2016	2018
2009		-1.657174 0.1279					
2012		-1.925028 0.0813	0.088500 0.4647				
2014		-3.534484 0.0021*	-0.999445 0.2779	-1.311673 0.1991			
2016		-2.388079 0.0445	-0.108662 0.4796	-0.244353 0.4707	1.158613 0.2354		
2018		-2.785336 0.0187*	-0.764392 0.3112	-0.979159 0.2645	0.166296 0.4796	-0.817129 0.3104	
2021		-4.735473 0.0000*	-1.583417 0.1322	-2.078983 0.0790	-0.686266 0.3042	-1.994819 0.0806	-0.751465 0.2969

FIGURA 74. COMPARACIÓN DE COBERTURA DE MACROALGAS EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 40.0986, df = 6, p-value = 0

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-	Row Mean	2006	2009	2012	2014	2016	2018
2009		1.692297 0.0865					
2012		-2.647959 0.0094*	-3.535623 0.0009*				
2014		-4.450668 0.0000*	-4.846058 0.0000*	-1.444349 0.1201			
2016		-3.530580 0.0007*	-4.163559 0.0001*	-0.549417 0.3599	0.980991 0.2286		
2018		-2.325107 0.0211*	-3.276705 0.0016*	0.020016 0.4920	1.321077 0.1399	0.513341 0.3545	
2021		-3.185835 0.0019*	-3.890757 0.0003*	-0.032282 0.5115	1.634289 0.0894	0.604995 0.3578	-0.050784 0.5302

FIGURA 75. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE HERBÍVOROS EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 14.3212, df = 6, p-value = 0.03

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)					
Col Mean-	Row Mean	2006	2009	2012	2014	2016	2018
2009		0.562868 0.3346					
2012		-2.031631 0.0554	-2.035383 0.0627				
2014		-2.182066 0.1019	-2.122610 0.0710	-0.029141 0.4884			
2016		-2.144222 0.0840	-2.079380 0.0658	0.068653 0.4963	0.103647 0.5070		
2018		-2.712418 0.0701	-2.611747 0.0473	-0.827235 0.3061	-0.830935 0.3279	-0.936772 0.3053	
2021		-1.557164 0.1140	-1.635701 0.1189	0.728945 0.3058	0.805558 0.2943	0.719277 0.2915	1.563448 0.1238

FIGURA 76. COMPARACIÓN DE LA BIOMASA DE PECES COMERCIALES EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 13.419, df = 5, p-value = 0.02

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)				
Col Mean-		2009	2012	2014	2016	2018
Row Mean						
2012		0.707453 0.3268				
2014		1.013120 0.2592	0.341266 0.4581			
2016		-0.244298 0.4656	-1.196349 0.2171	-1.626392 0.1113		
2018		-1.649449 0.1486	-2.669256 0.0190*	-3.073089 0.0079*	-1.752582 0.1494	
2021		0.952102 0.2558	0.221254 0.4419	-0.159931 0.4365	1.637058 0.1270	3.160058 0.0118*

FIGURA 77. COMPARACIÓN DE RIQUEZA DE ESPECIES EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 7.0602, df = 5, p-value = 0.22

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)				
Col Mean-		2009	2012	2014	2016	2018
Row Mean						
2012		0.448535 0.4458				
2014		0.550015 0.4853	0.105345 0.5285			
2016		-0.293349 0.4808	-0.926378 0.3321	-1.087879 0.2964		
2018		-1.342835 0.3362	-2.035821 0.1044	-2.204334 0.1031	-1.324201 0.2782	
2021		0.546182 0.4387	0.069174 0.5062	-0.048443 0.4807	1.155625 0.3098	2.322077 0.1517

FIGURA 78. COMPARACIÓN DEL N1 DE HILL EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 5.1529, df = 5, p-value = 0.4

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)				
Col Mean-	Row Mean	2009	2012	2014	2016	2018
2012		-0.249785 0.4300				
2014		0.121182 0.4518	0.439370 0.4503			
2016		-0.658233 0.4253	-0.443998 0.4928	-0.980337 0.4086		
2018		-1.224253 0.4141	-1.089834 0.4137	-1.591101 0.4185	-0.765497 0.4162	
2021		0.394791 0.4331	0.785114 0.4633	0.343727 0.4218	1.442561 0.3729	2.007787 0.3350

alpha = 0.05

FIGURA 79. COMPARACIÓN DEL N2 DE HILL EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

Kruskal-Wallis chi-squared = 11.2724, df = 5, p-value = 0.05

		Comparison of x by group (Benjamini-Hochberg)				
Col Mean-	Row Mean	2009	2012	2014	2016	2018
2012		1.016784 0.2577				
2014		2.143368 0.0802	1.317001 0.2013			
2016		0.221782 0.4757	-1.024838 0.2863	-2.499058 0.0934		
2018		0.113749 0.4872	-0.963789 0.2514	-2.184352 0.1085	-0.101717 0.4595	
2021		1.755504 0.0990	0.796986 0.2901	-0.677421 0.3113	2.068445 0.0724	1.775281 0.1138

FIGURA 80. COMPARACIÓN DEL IFA EN EL TIEMPO PARA QUINTANA ROO.

XIII. Anexo 5 Porcentaje de especies de coral de las diferentes regiones de la Península de Yucatán

Cobertura de cada especie de coral para las regiones de Quintana Roo se utilizaron datos de 2022 y para Banco de Campeche datos de 2016. La susceptibilidad a las enfermedades se obtuvo de Álvarez-Filip et al.,2022, la severidad del blanqueamiento se basa en los cálculos de los datos de HRI desde el 2015 al 2017 del monitoreo de blanqueamiento y los valores de morfología de colonias y densidad de Perry, et al., 2019.

Especie	REGIÓN							ENFERMEDAD DE CORAL		BLANQUEAMIENTO	HURACANES	
	Banco de Campeche	Banco de Campeche en Yucatán	Norte de Quintana Roo	Cozumel	Central Quintana Roo (Sian Ka'an)	Banco Chinchorro	Sur de Quintana Roo	SUSCEPTIBLE A SCLTD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	Severidad al blanqueamiento	Morfología*	Densidad (g/cm ³) *
<i>Acropora cervicornis</i>	0	0	0	0.1	0.4	0	0	no	Nula	Bajo	Ramosos	1.96
<i>Acropora palmata</i>	0.4	0	2.8	0.3	0.6	0.1	0.1	no	Nula	Bajo	Ramosos	1.83
<i>Acropora prolifera</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Ramosos	1.83
<i>Agaricia agaricites</i>	0.1	0.06	1.3	3.8	3.9	3.5	3.1	no	Nula	Alto	Incrustantes/submasivo	1.95
<i>Agaricia fragilis</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Alto	Plato	2.31
<i>Agaricia humilis</i>	0	0	0.2	0	0	0	0	no	Nula	Alto	Incrustantes/submasivo	1.95
<i>Agaricia lamarcki</i>	0.1	0.12	0	0	0.3	0	0	no	Nula	Alto	Plato	2.14
<i>Agaricia sp.</i>	0.1	0.06	0	0	0	0	0	no	Nula	Alto	Plato	2.31
<i>Agaricia tenuifolia</i>	0	0	1	2	0.1	0.7	0.4	no	Nula	Alto	Folioso	2.14
<i>Colpophyllia natans</i>	2.7	0.24	0	0	0.2	0.8	0	sí	Alta	Medio	Masivo	0.78
<i>Dendrogyra cylindrus</i>	0	0	0	0	0	0.2	0	sí	Muy alta	Bajo	Columnar	1.55
<i>Dichocoenia stokesii</i>	0.1	0	0	0	0.1	0	0	sí	Media	Bajo	Masivo	2.17
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	1	0	0	0	0.2	0.4	0.2	sí	Alta	Medio	Masivo	1.43
<i>Eusmilia fastigiata</i>	0.1	0.12	0	0	0	0.3	0	sí	Alta	Medio	Ramosos	1.3

	REGIÓN							ENFERMEDAD DE CORAL		BLANQUEAMIENTO	HURACANES	
Especie	Banco de Campeche	Banco de Campeche en Yucatán	Norte de Quintana Roo	Cozumel	Central Quintana Roo (Sian Ka'an)	Banco Chinchorro	Sur de Quintana Roo	SUSCEPTIBLE A SCTLD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	Severidad al blanqueamiento	Morfología*	Densidad (g/cm ³) *
<i>Favia fragum</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Bajo	Submasivo	1.55
<i>Helioseris cucullata</i>	0	0	0	0	0.1	0	0	no	Nula	Alto	Plato	2.17
<i>Isophyllia rigida</i>	0	0	0	0	0	0	0	sí	Baja	Alto	Masivo	1.55
<i>Isophyllia sinuosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	sí	Baja	Alto	Masivo	1.55
<i>Madracis auretenra</i>	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0	no	Nula	Bajo	Ramosos	1.66
<i>Madracis decactis</i>	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	no	Nula	Bajo	Incrustantes/submasivo	1.95
<i>Meandrinia meandrites</i>	0.1	0	0	0	0	0.6	0	sí	Baja	Bajo	Masivo	1.9
<i>Millepora alcornis</i>	0	0	0.4	0.5	1	0.3	0.6	no	Nula	Medio	Ramosos	1.51
<i>Millepora complanata</i>	0	0	0.2	0.1	0	0	0	no	Nula	Medio	Plato	2.27
<i>Millepora sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Plato	2.27
<i>Millepora strigosa</i>	0	0	0.1	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Plato	2.27
<i>Montastraea cavernosa</i>	5.8	8	0.1	0.2	0.4	1.5	0.3	sí	Media	Bajo	Masivo	1.64
<i>Mycetophyllia ferox</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	sí	Baja	Medio	Plato	2.27
<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	0	0	0	0	0	0	0	sí	Baja	Medio	Submasivo	1.55
<i>Mycetophyllia spp.</i>	0.2	0.1	0	0	0.1	0	0	sí	BAJA	Medio	Submasivo	1.55
<i>Orbicella annularis</i>	1.9	0	0.3	0.3	0.8	2.7	0.4	sí	Media	Alto	Masivo	1.63
<i>Orbicella faveolata</i>	5.6	1.06	0.9	0.3	1.3	0.8	1	sí	Alta	Alto	Masivo	1.26
<i>Orbicella franksi</i>	4.6	0.82	0.1	0	0.6	0.2	0	sí	BAJA	Alto	Masivo	2.03
<i>Orbicella sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	sí	Media	Alto	Masivo	1.26

Especie	REGIÓN							ENFERMEDAD DE CORAL		BLANQUEAMIENTO	HURACANES	
	Banco de Campeche	Banco de Campeche en Yucatán	Norte de Quintana Roo	Cozumel	Central Quintana Roo (Sian Ka'an)	Banco Chinchorro	Sur de Quintana Roo	SUSCEPTIBLE A SCTLD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	Severidad al blanqueamiento	Morfología*	Densidad (g/cm ³) *
<i>Porites astreoides</i>	0.7	0.06	2.2	2.4	2.4	1.2	2.3	no	Nula	Bajo	Submasivo	1.5
<i>Porites divaricata</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Ramosos	1.18
<i>Porites furcata</i>	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	no	Nula	Alto	Columnar	1.69
<i>Porites porites</i>	0.1	0	0.7	2.1	1.1	0.9	0.5	no	Nula	Alto	Ramosos	1.18
<i>Porites porites, Porites furcata o Porites divaricata</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Alto	Ramosos	1.18
<i>Porites sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Alto	Ramosos	1.18
<i>Pseudodiploria clivosa</i>	0.1	0	0	0	0	0	0.1	sí	Alta	Medio	Masivo	1.2
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1.8	1.35	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	sí	Alta	Medio	Masivo	1.2
<i>Scolymia sp.</i>	0	0.06	0	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Vida libre	1.29
<i>Siderastrea radians</i>	0	0	0	0	0.1	0.3	0	no	Nula	Medio	Incrustantes/submasivo	1.51
<i>Siderastrea siderea</i>	1.2	1	0.2	0.6	0.6	2	1	sí	Alta	Alto	Masivo	1.51
<i>Solenastrea bournoni</i>	0	0	0	0	0	0	0	no	Nula	Medio	Masivo	1.55
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	0.2	0.24	0.1	0.1	0.2	0.5	0.2	no	Nula	Medio	Submasivo	1.55

Nota: las celdas en rojo indican las especies con los porcentajes más altos en cada región.