TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO CAMPUS CHETUMAL

Título:

Prevalencia de blanqueamiento coralino en tres sitios del arrecife de Mahahual Quintana Roo, México.

Directora:
Dra. Carmen Amelia Villegas Sánchez

Presentado por:
José Carlos Caporal Ramos

Tesis para obtener el título de:
licenciado en Biología

Chetumal Quintana Roo 2025

Agradecimientos

A mi madre, mi soporte más grande, ejemplo a seguir, incansable y valiente guerrera quien me dio la vida y desde temprana edad me enseñó a siempre dar lo mejor, inculcándome valores entre los que se destaca el apreciar lo extraordinario en lo ordinario, lo que me llevó a amar la vida y a desear estudiarla para comprenderla. Dicho deseo se ha convertido en la mejor y más valiosa herramienta que me pudo regalar, mi educación. A mi padre y demás familia, en especial a las Ramos-Téscum que me impulsaron a convertirme en un profesionista.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de mi directora de tesis Dra. Carmen Amelia Villegas Sánchez y a su esposo Mtro. José Héctor Lara Arenas durante el proceso de identificación de corales y a quienes les agradezco por ser pilares en mi formación académica, por motivarme a seguir aprendiendo, y por hacer a cada una de sus clases una experiencia muy grata donde se refleja su vocación por la enseñanza para formar a nuevos profesionistas.

Quiero agradecer al Tecnológico Nacional de México campus Chetumal, a los docentes que me enseñaron a lo largo de 4 años y a la psicóloga Michell Anette López Camarillo a quien conocí gracias a sus prácticas profesionales al brindar apoyo psicológico a los estudiantes. Su valiosa labor fue clave en mi continuidad en la carrera y atesoro las enseñanzas que he recibido gracias a su guía pues ella me enseñó que el éxito lo encontramos a medida que nos conocemos a nosotros mismos.

Finalmente quiero expresar mi gratitud a las amistades que obtuve a lo largo de la carrera, por mencionar algunos: Brisa, Edgardo, Estefany, Kimairi, Nahomy, Lizbeth y Zazil. Mi grupito de amistades mejor conocidos como “Las Mollejo”. Ustedes son el mejor recuerdo que me ha regalado la universidad.

Índice de contenido

Resumen 1
Abstract 3
Introducción 5
Antecedentes 11
Justificación 19
Objetivos 20
Metodología 21
Área de estudio 21
Trabajo de campo 22
Trabajo de gabinete 24
Análisis estadísticos 25
Resultados 27
Discusión 36
Sobre las prevalencias de blanqueamiento por sitios 36
Sobre las especies identificadas 39
Sobre los tamaños de las colonias afectadas 41
Respecto a la diversidad de los corales y sus diferencias en los sitios 41
Sobre los grandes grupos morfofuncionales y las coberturas en los sitios 42
Conclusiones 45
Recomendación 47
Referencias 48

índice de figuras

Figura 1……..22
Figura 2…..……..…..23
Figura 3……..24
Figura 4……..27
Figura 5……..29
Figura 6……..30
Figura 7……..31
Figura 8……..33
Figura 9…....……..34
Figura 10……..……..38

índice de tablas

Tabla 1…….…..…32
Tabla 2……..…….34

Resumen

Los arrecifes de coral son ecosistemas de gran importancia ya que son el hábitat de numerosos organismos acuáticos, entre los que se encuentran especies de importancia comercial y ecológica. Adicionalmente, proveen de numerosos servicios ecológicos como la protección a la zona costera, frenando la erosión de las playas cuando las olas rompen contra la cresta del arrecife y aminorando el impacto de los huracanes y las tormentas sobre la costa. Los ecosistemas coralinos tienen un impacto importante en la economía del mundo, en el año 2003 se estimó que aportaban una derrama económica cercana a los 30 billones de dólares estadounidenses a nivel mundial, gracias a su aprovechamiento como atractivos turísticos, a los recursos pesqueros y a los servicios de protección costera que proveen (Cesar et al., 2003). A pesar de su importancia, los arrecifes de coral enfrentan numerosas adversidades. Entre las perturbaciones de origen antropogénico se encuentran las descargas de aguas residuales, la deforestación y el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, factores que contribuyen al aumento de la turbidez del agua y afectan negativamente su salud; mientras que dentro de las perturbaciones naturales que afectan a los arrecifes se encuentran el paso de huracanes, las enfermedades que resultan en la muerte de los corales y el estrés por el aumento de la temperatura en el agua de mar que puede detonar el fenómeno de blanqueamiento coralino. El blanqueamiento de coral es una amenaza para los arrecifes del mundo, sucede cuando los corales pierden sus zooxantelas simbióticas resultado de su expulsión; derivando en la reducción del pigmento fotosintético y dejando a los corales de color blanco, lo que puede resultar en la muerte de la colonia coralina. El objetivo de este estudio fue establecer y comparar el porcentaje de blanqueamiento en tres sitios de muestreo en el arrecife de Mahahual, Quintana Roo, así como determinar la estructura comunitaria de los corales escletactíneos. Durante septiembre del año

2021, en Mahahual, se realizaron buceos scuba para videograbar de cinco a seis transectos en cada uno de los tres sitios muestreados del arrecife, frente a los hoteles Quinto Sole, Cuarenta Cañones y Arenas. Al momento de grabar los video-transectos se elaboró una base de datos *in situ*, donde se registraron las especies de corales que presentaron blanqueamiento coralino y el porcentaje de blanqueamiento de las colonias. Se obtuvo que el promedio de la prevalencia de blanqueamiento para el arrecife de Mahahual fue de 4.79%. Las especies afectadas por el fenómeno de blanqueamiento coralino fueron *Agaricia agaricites, Montastraea annularis, Montastraea faveolata y Montastraea franksi.* No se encontraron diferencias significativas ni en la estructura comunitaria de los corales pétreos ni en las prevalencias de blanqueamiento entre los tres sitios muestreados en el arrecife de Mahahual. Esto sugiere que las especies registradas en el estudio corresponden a aquellas que han logrado adaptarse y sobrevivir a las adversidades que ha enfrentado el arrecife. Asimismo, la ausencia de diferencias significativas en los porcentajes de prevalencia de blanqueamiento podría indicar que todo el arrecife está siendo afectado de manera homogénea por este fenómeno.

Palabras clave: Video-transectos, Fotogramas, porcentaje de blanqueamiento.

Abstract

Coral reefs are ecosystems of great importance as they are habitats for numerous aquatic organisms, including species of commercial and ecological importance. Additionally, they provide numerous ecological services such as coastal protection, slowing beach erosion when waves crash against the reef crest, and mitigating the impact of hurricanes and storms on the coast. Coral reefs have a significant impact on the global economy; in 2003, it was estimated that coral ecosystems contributed an economic value of nearly US$30 trillion worldwide, thanks to their use as tourist attractions, the fisheries provided, coastal protection services (Cesar et al., 2003). Despite their importance, coral reefs face numerous adversities. Among the disturbances of anthropogenic origin are the discharge of wastewater, deforestation and the intensive use of fertilizers and agrochemicals, factors that contribute to the increase in water turbidity and negatively affect its health; while natural disturbances affecting reefs include the passage of hurricanes, diseases that result in coral death, and stress from rising seawater temperatures, which can trigger coral bleaching. Coral bleaching is a threat to the world's reefs. It occurs when corals lose their symbiotic zooxanthellae because of their expulsion; this leads to a reduction in photosynthetic pigment and leaves the corals white, which can result in the death of the coral colony. The objective of this study was to establish and compare the percentage of bleaching at three sampling sites on Mahahual reef in Quintana Roo, as well as to determine the community structure of scletactinean corals. During September 2021, scuba dives were conducted in Mahahual to video record five to six transects at each of the three sampled reef sites off the Quinto Sole, Cuarenta Cañones, and Arenas hotels. At the time of recording the video transects, an *in situ* database was created, recording the coral species that experienced coral bleaching and the percentage of colony bleaching. The average bleaching prevalence for the Mahahual reef was

4.79%. The species affected by coral bleaching were *Agaricia agaricites, Montastraea annularis, Montastraea faveolata*, and *Montastraea franksi*; no significant differences were found in either the community structure of stony corals or in the prevalence of bleaching among the three sampled sites on the Mahahual reef. This suggests that the species recorded in the study are those that have managed to adapt and survive the adversities the reef has faced. Furthermore, the absence of significant differences in the prevalence rates of bleaching could indicate that the entire reef is being affected uniformly by this phenomenon.

Keywords: Video-transects, Frames, bleaching percentage.

Introducción

Los corales son animales que no poseen cabeza, sistema nervioso central ni estructuras diferenciadas para el intercambio gaseoso y la circulación. Los corales pétreos, también llamados madrépora, pertenecen al orden Scleractinia, y producen un esqueleto constituido por aragonito, mayormente llamado carbonato de calcio. Estos organismos, comúnmente se encuentran en colonias constituidas por numerosos pólipos pequeños que secretan el carbonato de calcio a partir de su disco basal y la epidermis de la zona inferior de la columna (Ruppert & Barnes, 1996).

Los pólipos de una colonia se encuentran conectados entre sí de forma lateral gracias a pliegues en las paredes de las columnas y a una lámina de tejido. La manera en la que se conectan los pólipos moldea la forma del esqueleto de la colonia e influye en su crecimiento. La velocidad del crecimiento de los corales varía según la especie, la temperatura del agua y la luminosidad en donde se encuentren. Por ejemplo, algunos corales planos o en forma de cúpula como *Siderastrea siderea* crecen de tres milímetros a dos centímetros en un año, mientras que algunos corales ramificados como *Acropora cervicornis* pueden crecer hasta 10 centímetros en ese mismo lapso (Ruppert & Barnes, 1996).

Los corales se reproducen sexualmente mediante la liberación de gametos al mar, donde ocurre la fecundación. Este proceso da lugar a una larva ciliada llamada plánula, que, tras completar su metamorfosis, se asienta y fija en un sustrato adecuado. A partir de este momento, comienza el desarrollo de un pólipo inicial, del cual surgirá el resto de la colonia a través del proceso de gemación. De este modo, las colonias de coral contribuyen a la formación de arrecifes coralinos (Ruppert & Barnes, 1996). Algunas especies presentan reproducción asexual mediante fragmentación; por ejemplo, *Acropora palmata* crece de forma ramificada y, cuando

una parte se desprende de la colonia original, puede originar una nueva colonia a partir del fragmento (Banaszak et al., 2018).

Los arrecifes coralinos se encuentran entre los ecosistemas más diversos a nivel mundial (Ruppert & Barnes, 1996). En los arrecifes de coral se pueden encontrar peces, reptiles, bivalvos, tunicados, briozoos, poríferos y varios tipos de gusanos. Sirven de guardería para muchas especies en sus estados juveniles, ofrecen alimento y refugio a muchas especies y, en algunos casos, son hábitat de especies que solo se encuentran allí (Ruppert & Barnes, 1996).

Los arrecifes de coral protegen las zonas costeras al reducir el impacto del oleaje, lo que ayuda a prevenir la erosión de las playas. Además, contribuyen a la formación de arena (Calderón-Aguilera & Reyes-Bonilla, 2007) y mitigan los efectos de fenómenos climáticos extremos como tormentas o huracanes. También proporcionan recursos pesqueros vitales para las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas (Vizcarra et al., 2008).

Ubicados típicamente en zonas marinas oligotróficas, estos sistemas arrecifales se caracterizan por estar rodeados de aguas transparentes y de tonalidades azuladas. Tienden a desarrollarse en zonas tropicales y subtropicales de aguas poco profundas (Ruppert & Barnes, 1996). La distribución de los arrecifes se ve limitada por la luz solar y la temperatura del agua. Las aguas en las que se encuentran tienen un rango de temperatura de entre 20 y 28 grados centígrados. A nivel mundial se encuentran en el Caribe, el océano Índico y en la zona tropical del océano Pacífico (Ruppert & Barnes, 1996).

Según la estructura y sustrato donde se encuentren los arrecifes pueden clasificarse en tres tipos: atolones cuando están sobre volcanes sumergidos en forma circular u oval, generalmente con una laguna central (Ruppert & Barnes, 1996); costeros cuando se encuentran

mar adentro, siendo este el tipo más común (Ruppert & Barnes, 1996), y arrecifes de barrera, los cuales tienen una laguna que los separa de la tierra.

En el año 2003 se calculó que el aporte económico de los arrecifes para el mundo fue de 29.8 mil millones de dólares, de los cuales el turismo aportó $9.6 mil millones, y las actividades pesqueras relacionadas al arrecife $5.7 mil millones (Cesar et al., 2003). En el Caribe, sin incluir los territorios de estados unidos, los arrecifes aportan una derrama económica regional de 1,853 millones de dólares (Cesar et al., 2003).

Los ecosistemas coralinos enfrentan numerosas amenazas que ponen en riesgo su supervivencia, incluidas las de origen antropogénico, como la sobrepesca, la deforestación en cuencas hidrográficas (McField & Kramer, 2007), la contaminación del agua por drenajes y las prácticas inadecuadas de los turistas en áreas arrecifales (Cesar et al., 2003). También están expuestos a amenazas naturales, como las alteraciones climáticas (Jameson et al., 2001), enfermedades que afectan su salud y fenómenos como el blanqueamiento coralino.

El termino blanqueamiento se refiere a la expulsión de las algas simbiontes, conocidas como zooxantelas, de las células gastrodérmicas de los corales (Glynn, 1993). Éste fenómeno ocurre cuando los corales sufren estrés que puede ser causado por factores como la temperatura, contaminación, sobre exposición a la luz solar o exposición al aire por tiempo prolongado.

El tejido blanqueado puede no ser uniforme en toda la colonia y suele tener una apariencia traslucida a pesar de que el pólipo siga vivo y aun presente en el esqueleto de la colonia. Las colonias de corales pueden recuperar sus zooxantelas después de unos cuantos meses de haberlas perdido, con la condición de que el estrés responsable del blanqueamiento no se mantenga constante por mucho tiempo (McField & Kramer, 2007).

La alta productividad que se presenta en las zonas arrecifales (Ruppert & Barnes, 1996) es resultado de la relación simbiótica entre el coral y las zooxantelas, estas últimas reaccionan incrementando su producción fotosintética cuando su coral hospedero lo demanda, aumentando así la concentración de nutrientes y facilitando la absorción de la luz solar (Adams et al., 2020). Por lo anterior, cuando los corales pierden a las zooxantelas no solo pierden su color, sino que también pierden su principal fuente de energía. Los corales pueden satisfacer parte de sus necesidades nutricionales, así como las de sus simbiontes, a través de las presas que consumen. No obstante, los corales obtienen glicerol, glucosa y alanina gracias al proceso fotosintético de las algas que, a cambio obtienen nutrientes inorgánicos del coral provenientes de sus desechos metabólicos como amoniaco y dióxido de carbono. Hasta el 50% del nitrógeno proteico del coral puede provenir de las zooxantelas, la simbiosis entre estos organismos facilita la formación del esqueleto del coral (Ruppert & Barnes, 1996).

Si la pérdida de zooxantelas no es recuperada deriva en la muerte del coral (Eakin et al., 2010). La mortalidad causada por el blanqueamiento coralino puede resultar en la pérdida de la diversidad de los arrecifes, afectando directamente a su resiliencia (McField & Kramer, 2007).

Entre los eventos de blanqueamiento coralino importantes en el mundo durante las últimas décadas del siglo XX se destacan los acontecidos entre los años 1979 a 1980, de 1982 a 1983 y de 1986 a 1988. Cada uno de estos tuvieron un evento un año antes a una escala menor (Williams & Bunkley-Williams, 1990).

Otros blanqueamientos en distintos lugares del mundo son los ocurridos en noviembre de 1987 en Puerto Rico; noviembre de 1987 en la isla caribeña Curazao de los países bajos; en mayo 1988 en el sureste de los Estados Unidos; en junio de 1988 en los cayos de la Florida, San

Salvador y Bahamas; en agosto de 1988 en Australia; en mayo 1989 en Puerto Rico, y en 1990 en Cuba (Williams & Bunkley-Williams, 1990).

El Sistema Arrecifal Mesoamericano es el segundo arrecife de barrera más largo en el mundo, se ubica en el Mar Caribe y se extiende frente a las costas de México, Belice, Guatemala y Honduras (Ruppert & Barnes, 1996). En esta zona, el blanqueamiento es un problema común, del cual se tienen registros desde 1995 (Brown, 1997). En la localidad de Mahahual este problema supone un gran riesgo tanto para el ambiente como para los pobladores.

El poblado turístico de Mahahual se ubica a la orilla del mar caribe en el municipio de Othón P. Blanco en el estado de Quintana Roo. Forma parte de la reserva de la Biosfera del Caribe Mexicano, decretada el siete de diciembre del año 2016. Esta reserva alberga aproximadamente 86 especies de corales y hasta 500 especies de peces según la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT, 2018).

El programa de desarrollo urbano de Mahahual 2021-2050 menciona que en el año 2000 la población de Mahahual era de aproximadamente 160 habitantes, y en el censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) durante el año 2020, reportó que el número de habitantes en Mahahual era de 2636 personas. Los habitantes de Mahahual aprovechan el arrecife de coral, los servicios que ofrece y los recursos de que dispone, al usar el sitio como un atractivo turístico y de pesca. En este arrecife se llevan a cabo diversas actividades, como esnórquel, buceo, pesca deportiva, captura de especies para consumo humano, así como comercio y manufactura de artesanías. Por lo tanto, la pérdida de estos ecosistemas conllevaría la desaparición de los servicios ambientales que proporcionan, la disminución de recursos vitales para la comunidad de Mahahual, la pérdida de hábitats esenciales para numerosas especies y, en consecuencia, una reducción significativa de la biodiversidad. De ahí la

necesidad de realizar la presente investigación, para contribuir en el conocimiento sobre las problemáticas que dañan y ponen en peligro al arrecife de coral del que tantos organismos dependen y muchos seres humanos utilizan para subsistir.

Antecedentes

En 1985, Glynn y colaboradores publicaron un estudio sobre la mortalidad de corales en la isla Uva, ubicada en el golfo de Chiriquí, Panamá. La investigación surgió a raíz de la observación de diferentes grados de blanqueamiento en los corales de esta región, lo que generó interés en determinar si la causa podía estar relacionada con la presencia de un organismo patógeno. El arrecife fue visitado cuatro veces durante nueve meses en las fechas del 18 al 21 de marzo, 26 al 28 de abril, 23 al 24 de junio y del 29 al 30 de octubre. Durante sus estudios se extrajeron fragmentos de 4 a 5 centímetros que provenían de colonias que presentaban blanqueamiento, esto con la finalidad de injertarlos en colonias sanas. De igual manera se extrajeron fragmentos de la misma longitud de colonias de coral sanas para injertar en colonias que presentaban blanqueamiento. Dichos intercambios de injertos entre colonias blanqueadas y sanas se revisaron en campo después de uno, tres y siete meses, con la finalidad de comprobar si se trataba de una infección que resultaba en el blanqueamiento coralino y que se transmitiera entre los corales. De estos experimentos no se encontró evidencia alguna que pudiera relacionar el blanqueamiento coralino con un agente infeccioso que afectara a los corales de ese estudio. Adicionalmente, se recolectaron muestras de diferentes especies de colonias blanqueadas y se analizaron con microscopía y microscopía electrónica para determinar si había microrganismos patógenos en los tejidos de los corales. Sin embargo, los análisis no revelaron la presencia de ningún organismo patógeno. De sus estudios se obtuvieron reportes de blanqueamiento y muy alta mortalidad coralina con un 95% de afectación en la cobertura total del arrecife de la isla Uva. Para fines del mes de abril y finales del mes de octubre del 85% al 95% de todos los corales que se encontraban en el arrecife de la isla Uva estaban muertos. La pérdida de las zooxantelas por el evento de blanqueamiento coralino que influyó en la mortalidad coralina reportada fue

atribuida a cambios en el metabolismo de los corales causados por estresores externos, principalmente por aumento de la temperatura del medio acuático.

En el año de 1990 Williams y Bunkley-Williams estudiaron el ciclo de blanqueamiento coralino a nivel mundial y las variables relacionadas a la mortalidad de los corales. Los autores mencionan que los fenómenos de blanqueamiento ocurrieron en un rango de tiempo próximo, pero en zonas geográficas muy distantes entre sí. Por ejemplo, eventos simultáneos ocurrían en los cayos de Florida en América del Norte y en la gran barrera de coral ubicada en Australia. Dejando en evidencia un patrón temporal que se repite en forma de un proceso cíclico y predecible con relación al aumento de temperatura del mar, que sucede según la temporada del año o por fenómenos como "El niño", que es agravante para el blanqueamiento coralino, sugiriendo que el aumento de temperatura global contribuye a un ciclo de muerte coralina.

Los autores Williams y Bunkley-Williams, (1990) propusieron un modelo que indica que los fenómenos de blanqueamiento coralino continuaran ocurriendo en intervalos de tres a cuatro años, y la severidad dependerá de la intensidad que presente el fenómeno de "El niño". Si los fenómenos de blanqueamiento se vuelven cíclicos y afectan en un rango geográfico amplio, se prevé que las algas simbiontes no podrán recuperarse por completo en los corales, causando que los futuros eventos de blanqueamiento sean cada vez más devastadores, aunque no aumenten su severidad. Esto debido a que no habrá tiempo suficiente para que los corales tengan una recuperación total, poniendo en riesgo la existencia de los arrecifes (Williams y Bunkley-Williams, 1990).

Glynn en el año 1993 estudió las perspectivas ecológicas del blanqueamiento de coral. El autor sugiere que el blanqueamiento a pequeña escala probablemente ocurre por factores de estrés particular como temperatura, salinidad, luz, sedimentación, exposición al aire y a

contaminantes; mientras que el blanqueamiento a gran escala es causado por fenómenos como el cambio climático, el efecto invernadero, el aumento de luz ultravioleta y su radiación, el deterioro de la salud del ambiente o la combinación de algunos de los factores anteriores.

Glynn en 1993 resumió dos escenarios respecto al blanqueamiento coralino y el aumento de la temperatura en el nivel del mar. En el primer escenario menciona que los eventos de calentamiento terminarían en la década de 1980, debido a que especulaban que el aumento de la temperatura en el mar eran el resultado de una tendencia de aumento de la temperatura global que creían que terminaría en esa década. Los blanqueamientos reportados durante esa década solían mantenerse contenidos en pequeñas áreas, afectando pequeñas porciones del arrecife. En el segundo escenario propuesto por Mitchell en 1988 y Manabe y colaboradores en 1991, se menciona que el aumento en la temperatura del nivel del mar es resultado del calentamiento global, el cual aumentará entre uno y dos grados centígrados más entre 2030 y 2050. Los autores Potts y Garthwaite en 1991 publicaron que los corales deben de evolucionar rápidamente junto con sus zooxantelas simbióticas para poder resistir los cambios ambientales, causando desde diferenciaciones permanentes de poblaciones, hasta la creación de nuevas especies.

Brown en el año 1997, mediante análisis de datos de temperatura, blanqueamiento inducido por irradiación y datos a largo plazo, determinó que los eventos de blanqueamiento coralino pueden ser resultado del aumento de la temperatura en el medio marino. De igual forma describió algunos mecanismos celulares y procesos que se involucran en el blanqueamiento coralino como la degeneración de las zooxantelas, la liberación de algas de las células hospederas del endodermo y las defensas fotoprotectoras para combatir al blanqueamiento.

Ruiz-Zárate y colaboradores en el año 2003 evaluaron la condición de los ecosistemas coralinos en el centro y sur de Quintana Roo, reportando una disminución en las coberturas de

corales pétreos vivos que iba del 12 al 25% en menos de 10 años, lo que representa una mortandad elevada y preocupante para los arrecifes. El evento de blanqueamiento de 1999 aparentaba ser responsable de gran parte de esa mortandad. En Mahahual, el sitio muestreado, presentaba aproximadamente un 17% de cobertura de corales pétreos y los corales en promedio alcanzaban un diámetro superior a los 25 cm.

Los autores Mcfield y colaboradores, durante el año 2007, publicaron un estudio sobre el estado del sistema arrecifal mesoamericano (SAM) después del evento de blanqueamiento masivo del año 2005. En su trabajo mencionan que el primer evento masivo de blanqueamiento coralino que afectó al SAM fue en el año 1995, y que eventos similares ocurrieron durante los años 1998 y 2005. Durante el evento de blanqueamiento del año 2005 se reportó en el SAM un 40% de afección en los corales y puntualmente en los arrecifes frente Mahahual, frente a Sian Ka'an y frente a Xcalak los porcentajes de blanqueamiento fueron respectivamente de 23%, 42% y 45%.

Eakin y colaboradores en el año 2010 publicaron un trabajo sobre la crisis que pasaron los corales durante el año 2005 por el estrés térmico en toda la cuenca del Mar Caribe. Concluyeron que la temperatura registrada en el año 2005 excedió a cualquier otra registrada anteriormente y que hay una relación significativa entre el estrés térmico y la intensidad del blanqueamiento de coral. También mencionan que la mortalidad tan severa a largo plazo destruirá a esos ecosistemas marinos.

Ruiz-Moreno y colaboradores en el año 2012 estudiaron la prevalencia de enfermedades coralinas asociadas con anomalías térmicas. Los autores observaron que el aumento de la temperatura se relaciona con una mayor incidencia de enfermedades. Sin embargo, los corales de

las familias Acroporidae, Poritidae y Agariciidae mostraron no solo una alta abundancia, sino también una notable resistencia a las enfermedades en la región del Caribe.

Chuc-contreras y colaboradores en el año 2012, analizaron los cambios en la cobertura coralina y la proliferación de macroalgas en el arrecife de Mahahual, Quintana Roo, durante 2010. En su estudio, los autores destacan que las macroalgas constituyen una de las principales amenazas para los corales debido a su competencia por espacio, nutrientes y luz, lo que afecta negativamente el desarrollo y la supervivencia de las colonias coralinas. El muestreo se realizó en tres zonas del arrecife: sur, centro y norte. En la zona norte, observaron una menor abundancia de corales y una mayor cobertura de algas, principalmente cianofitas, lo cual atribuyeron a la cercanía de un desagüe de residuos del pueblo local, que podría estar incrementando la cantidad de nutrientes y sedimentos asociados al drenaje. Los investigadores concluyeron que, en promedio, los sitios muestreados presentaron una mayor dominancia de los géneros *Montastrea* y *Diploria* para los corales, mientras que las algas más dominantes fueron el turf y las cianofitas. En particular, el turf cubría el 24% de la superficie total sobre los corales del género *Montastrea* y el 50% sobre los del género *Diploria*, mientras que las cianofitas cubrían el 22% de los *Montastrea* y el 25% de los corales del género *Diploria*.

En el año 2013 Acosta-Gonzalez y colaboradores reportaron que en el año 2000 el arrecife frente a las costas de Mahahual, Quintana Roo, poseía una mayor diversidad y cobertura coralina en comparación con los años posteriores, hasta 2010. Según los autores, desde entonces el paisaje arrecifal comenzó a experimentar un proceso de deterioro, reflejado en el declive de la cobertura de coral.

En el año 2016 Rendis y colaboradores publicaron un artículo donde se documentó la transformación del paisaje arrecifal frente a la localidad de Mahahual, Quintana Roo. En su

artículo, señalaron que entre los años 2000 y 2006, el paisaje costero experimentó cambios significativos debido al desarrollo urbano de la zona y a la construcción de un muelle con capacidad para recibir cruceros turísticos. El estudio se llevó a cabo mediante la aplicación de 96 video-transectos, los cuales fueron analizados a partir de 40 fotogramas cada uno. En cada fotograma se establecieron 13 puntos, con el objetivo de identificar el organismo ubicado en cada punto, clasificándolo dentro de un gran grupo morfofuncional. Para complementar el análisis, los autores utilizaron imágenes del satélite IKONOS, con el objetivo de generar mapas comparativos de la cobertura de vegetación terrestre y coralina. Los resultados indicaron que, en un periodo de seis años, la cobertura arrecifal se redujo en 43 hectáreas. Esta pérdida fue atribuida tanto a factores naturales, como eventos de blanqueamiento coralino y huracanes, como a presiones antropogénicas, entre ellas la construcción del muelle y el crecimiento urbano de Mahahual, lo que además ocasionó la pérdida de 85 hectáreas de cobertura vegetal.

En el año 2016 los autores Sosa Ferreira y Martínez estudiaron los cambios en el paisaje de Mahahual causados por la afluencia de cruceros que tendía a aumentar, en su trabajo los autores mencionan que Mahahual, al igual que Cozumel, es uno de los destinos turísticos más concurridos por cruceros en el Caribe mexicano, así como una de las zonas turísticas con mayor desarrollo en el sur, lo que implica un cambio en su paisaje para poder cubrir la demanda turística. Estos cambios implicaron un aumento de la mancha urbana, la construcción de nuevos hoteles y restaurantes frente a la playa, además de la construcción y equipamiento del muelle para recibir grandes cruceros turísticos.

Eakin y colaboradores en el año 2019 afirman que en 1998 se registró un evento de blanqueamiento coralino a nivel mundial. Casi una década después, en el año 2010, se registró un segundo evento de igual magnitud y durante los años 2014 al 2017 ocurrió el tercer

blanqueamiento coralino a escala global que se mantuvo de forma consecutiva por 36 meses. Los autores concluyen que los intervalos de tiempo en los que se presentan los eventos de blanqueamiento coralino a nivel mundial han cambiado, debido a que las ondas de calor en el mar suceden con mayor frecuencia e intensidad, aumentando el estrés térmico en los arrecifes y elevando la severidad del blanqueamiento.

Eakin y colaboradores en 2019 redactaron que en el siglo pasado los eventos de blanqueamiento coralino sucedían una vez cada 25 a 30 años y en zonas geográficamente delimitadas. Sin embargo, actualmente ocurren en intervalos de 6 años o menos y en zonas geográficas más amplias; amenazando a los arrecifes, pues mencionan que, incluso los corales de crecimiento rápido en los arrecifes mejor conservados requieren de 10 a 15 años para recuperarse.

Los autores Mex-Novelo y colaboradores en el año 2021 determinaron la cobertura de los corales pétreos en el frente arrecifal de Mahahual mediante la videograbación de 45 transectos en cinco sitios del arrecife. Se reportó una riqueza de 29 especies de corales pétreos con una cobertura coralina de 8.7%, y una disminución de 22% respecto al año de 1998 en el mismo lugar. Gracias al protocolo para la evaluación rápida de arrecifes del Atlántico y el golfo o por sus siglas en inglés AGRRA (Atlantic & Gulf Rapid Reef Assessment) se determinó que en la fecha de realización del muestreo (agosto del 2019) la condición en la que se encuentra el arrecife de Mahahual era mala, lo cual pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo estudios sobre los eventos que afectan negativamente a este ecosistema.

En el año 2025 reportes de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) confirmaron que, entre enero de 2023 y mayo de 2025, el planeta atravesó el cuarto evento global de blanqueamiento coralino, el cual afectó aproximadamente al 83.7 % de los arrecifes de

coral en al menos 83 países y territorios. Este evento se ha convertido en el de mayor magnitud registrado hasta la fecha.

Justificación

El aumento de la temperatura es un factor estresante para los corales, puede provocar el blanqueamiento coralino debido a la expulsión de las zooxantelas del tejido de estos animales. Este fenómeno puede resultar en la muerte de dichos organismos, lo que pone en peligro a los arrecifes al aumentar la mortalidad y reducir la cobertura coralina en áreas específicas, afectando negativamente la estructura y funcionalidad de estos ecosistemas (Eakin et al., 2010).

Se prevé que los eventos de blanqueamiento coralino continúen ocurriendo en el futuro, lo que destaca la necesidad de mantener un monitoreo constante de su prevalencia a lo largo del tiempo. Esta vigilancia permitirá evaluar el grado de afectación del arrecife y diseñar estrategias efectivas de conservación para preservar este ecosistema. Además, una mejor comprensión del impacto del blanqueamiento facilitará la identificación de soluciones que garanticen la supervivencia de las especies que dependen de estos hábitats, así como el bienestar de las comunidades locales que obtienen su sustento de los recursos que el arrecife provee.

Aunque el arrecife de Mahahual era conocido popularmente como un arrecife con mucha diversidad, con el paso de los años la cobertura coralina del sitio ha disminuido, como se reportó en el estudio realizado en el año 2021 por Mex-Novelo y colaboradores. Para el caso específico del fenómeno del blanqueamiento, los estudios son escasos. Por lo que el presente estudio tiene como objetivo principal establecer los niveles de blanqueamiento en tres sitios del arrecife de Mahahual.

Objetivos

- Objetivo general: establecer y comparar el porcentaje de blanqueamiento en tres sitios de muestreo en Mahahual, Quintana Roo.

Objetivos específicos

- Identificar a las especies de coral con mayor afectación por blanqueamiento en los sitios evaluados.
- Determinar y comparar los niveles de blanqueamiento en los tres sitios de muestreo
- Establecer el tamaño de las colonias de coral afectadas en los sitios muestreados.
- Determinar las semejanzas en la estructura comunitaria de los corales entre sitios
- Establecer la diversidad de corales y probar si existen diferencias significativas entre sitios.
- Agrupar a los organismos identificados en grandes grupos morfofuncionales para compararlos entre sitios

Metodología

Área de estudio

Mahahual es un poblado costero situado en el municipio de Othón P. Blanco, en el estado de Quintana Roo, México. Frente a su litoral existe una laguna arrecifal poco profunda y angosta, con extensos parches de *Thalassia testudinum*, comúnmente conocida como "pasto de tortuga". Esta laguna está delimitada por una sección del Sistema Arrecifal Mesoamericano, y en la cresta del arrecife se encuentran dos canales que la conectan con el mar Caribe (Vásquez-Yeomans et al., 1998). El arrecife de Mahahual se localiza entre los 18°43'N y 18°46'N de latitud norte, y entre los 87°42'00"W y 87°42'27"W de longitud oeste. Su estrecha plataforma arrecifal incrementa su profundidad conforme se aleja de la costa (Suárez-Morales & Gasca, 2000).

Los sitios de muestreo fueron georreferenciados con tres hoteles que se encuentran en la costa de Mahahual (figura 1), estos son hotel Arenas, Quinto Sole y 40 Cañones cuyas coordenadas son:

Arenas: latitud: 18.70548 longitud: -87.70485

Quinto Sole: latitud: 18.71876 longitud: -87.70007

40 Cañones: latitud: 18.71218 longitud: -87.70329

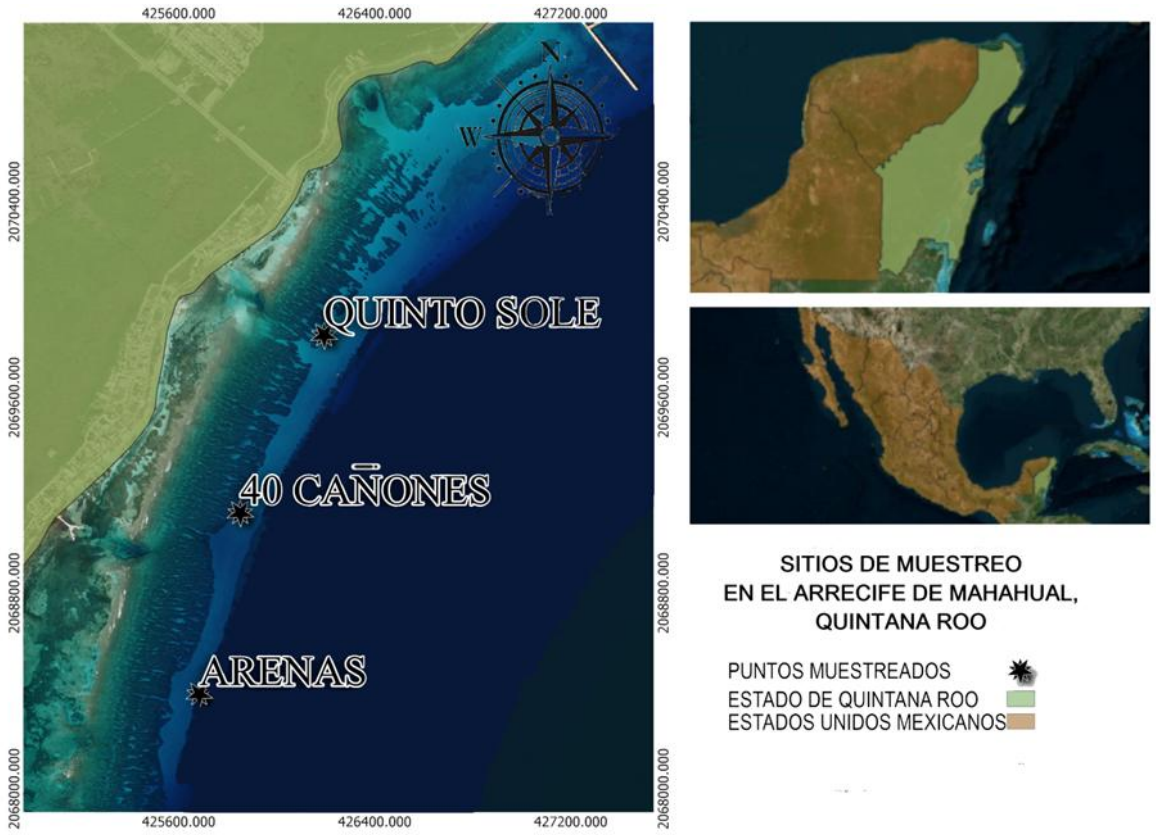


Figura 1: Imagen satelital de Mahahual con la ubicación de los sitios de muestreo. Mapa realizado por Rodríguez L.

Trabajo de campo

El 13 de septiembre del año 2021 se realizó el muestreo. En cada uno de los tres sitios seleccionados se trazaron entre cinco y seis transectos de 10 metros de largo por uno de ancho y sobre ellos, mediante buceos SCUBA se realizaron muestreos *in situ* para obtener los datos de los niveles de blanqueamiento. Adicionalmente, se grabaron video-transectos con el objetivo de determinar la abundancia de especies de corales presentes y las diversidades en cada sitio.

Los datos obtenidos mediante muestreos *in situ* fueron registrados utilizando tablas sumergibles, en las que se anotó el número del transecto, las especies presentes y las colonias que mostraban signos de blanqueamiento coralino. Para estas últimas, se anotaron tanto el porcentaje de afectación como el tamaño estimado de cada colonia. Este último dato fue

determinado a partir de la medición del diámetro de cada colonia. Las colonias se clasificaron como pequeñas cuando presentaban un diámetro igual o inferior a 20 cm; como medianas, si el diámetro oscilaba entre 21 y 40 cm; y como grandes, cuando superaban los 40 cm de diámetro.

Los videos se obtuvieron utilizando una cámara GoPro Hero+, equipada con un estuche impermeable y una plomada sujeta a un hilo de 50 cm de longitud. La grabación se llevó a cabo nadando en línea recta sobre cada transecto (figura 2). Al concluir cada transecto, se realizaba una toma panorámica antes de detener la grabación. De cada videotransecto se analizaron 40 fotogramas, para ello, se dividió la duración total de cada grabación entre 40, obteniendo así el intervalo de tiempo necesario para pausar el video de manera sistemática.

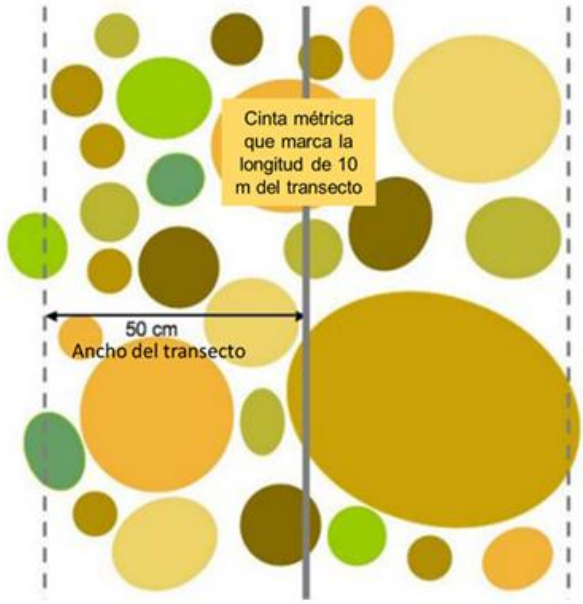


Figura 2: Ilustración de un transecto para grabar o recabar datos in situ recuperada del protocolo AGRRA (Lang et al., 2010).

En total se muestrearon 17 transectos. En los sitios 40 Cañones y hotel Arenas se muestrearon seis transectos, mientras que en el sitio frente al hotel Quinto Sole, fueron cinco debido a que las condiciones no fueron favorables para llevar a cabo el sexto.

Trabajo de gabinete

Para el análisis de los fotogramas se utilizó el software *Coral Point Count with Excel Extensions* (CPCe), que permite automatizar y agilizar el conteo de corales mediante un sistema de puntos aleatorios colocados sobre las imágenes (Kohler & Gill, 2006; figura 3). Los corales fueron identificados hasta el nivel de especie mediante sus características visuales, utilizando la guía de identificación *Reef Coral Identification: Florida, Caribbean, Bahamas* (Humann & Deloach, 2002), y comparando las observaciones con las referencias disponibles en el sitio web Coralpedia de la Universidad de Warwick (Coralpedia, 2013). Además, se contó con asesoría especializada durante el proceso de identificación (J. H. Lara-Arenas, comunicación personal, septiembre de 2022).

Los resultados de las identificaciones fueron registrados en una base de datos en formato Excel generada por el mismo software. En dicha base se incluye el transecto correspondiente, el número asignado a cada punto y el elemento identificado en ese punto. Además de los corales, los demás componentes del bentos fueron clasificados en seis grandes grupos morfofuncionales: Algas, algas coralinas, corales, esponjas, gorgonáceos, sustrato y turf.

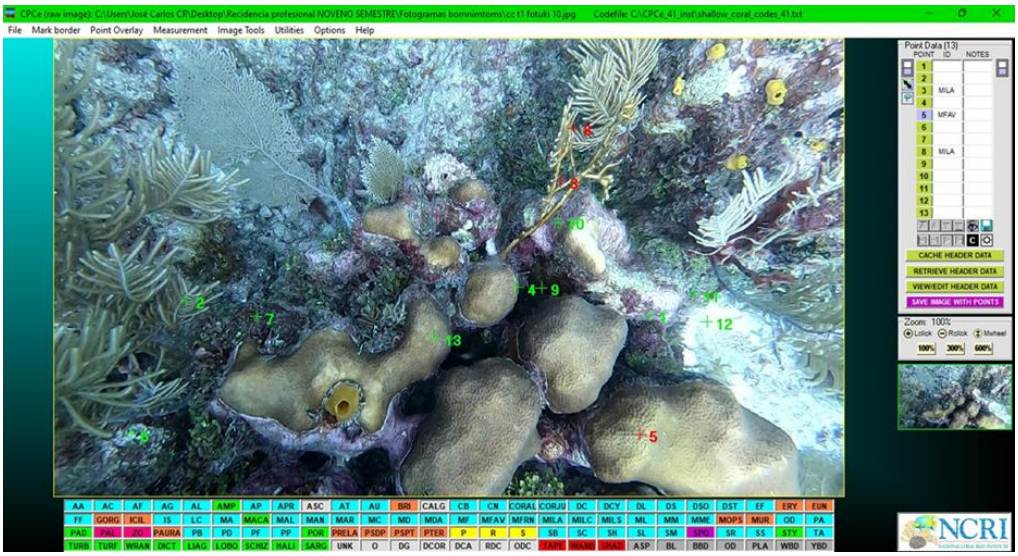


Figura 3: Imagen del software Coral Point Count with Excel extensions utilizado para realizar el análisis los fotogramas.

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se realizaron a partir de tres matrices de datos elaboradas en Excel. La primera matriz consistió en la transcripción directa de los datos recolectados en campo, que contenía las especies de coral muestreadas y su porcentaje de blanqueamiento. La segunda fue generada con base en las especies de corales identificadas mediante el análisis de los fotogramas procesados con el software Coral Point Count with Excel Extensions. La tercera matriz correspondió a los grandes grupos morfofuncionales.

A partir de la primera matriz se calculó la prevalencia del blanqueamiento coralino. Para comparar los porcentajes de blanqueamiento entre las diferentes especies, teniendo como factor los sitios de muestreo se aplicó una prueba ANOSIM.

La fórmula aplicada para establecer el porcentaje de blanqueamiento en cada sitio fue la siguiente:

$$\% \text{ de blanqueamiento} = \frac{\text{Número de colonias con blanqueamiento}}{\text{Total de colonias identificadas}}$$

Con la segunda matriz de datos, correspondiente a las especies de corales, los transectos de los distintos sitios se agruparon mediante el índice de similitud de Bray-Curtis, con el objetivo de evaluar la semejanza en la composición comunitaria a partir de las abundancias registradas. Este análisis permitió generar un dendrograma que visualiza los niveles de similitud entre transectos y facilita su agrupamiento para identificar patrones de afinidad.

Adicionalmente, se aplicó la prueba SIMPROF como contraste estadístico para determinar si las agrupaciones observadas en el dendrograma presentan diferencias significativas

en función de las abundancias de las especies. Esta prueba complementa la interpretación del dendrograma y refuerza la validez de los patrones detectados (PRIMER v7, 2024).

De forma complementaria, para representar gráficamente la estructura comunitaria de las especies de corales en los diferentes sitios, se realizó un gráfico de sombras utilizando el software PRIMER v7.

*La diversidad de especies en cada sitio fue evaluada mediante el índice de Shannon-Wiener. Y para determinar si existieran diferencias signficativas en las diversidades entre sitios se realizaron pruebas T de Hutcheson Pareadas mientras que las diferencias en la estructura comunitaria fueron analizadas a través de una prueba ANOSIM. Y Para comparar la diversidad entre los sitios se aplicó la prueba t de Hutcheson y determinar si existen diferencias significativas entre los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener.

La tercera matriz fue construida con los datos correspondientes a los grandes grupos morfofuncionales registrados en todos los sitios. A partir de esta matriz se generó un nuevo dendrograma y un gráfico de sombras, con el fin de comparar la distribución y composición de los grupos morfofuncionales entre los sitios muestreados.

Todos los análisis fueron realizados mediante el software PRIMER v7 (Clarke & Gorley, 2015).

Finalmente se realizaron dos pruebas ANOVA para comparar las coberturas de los corales y las coberturas de las algas entre los lugares muestreados con la finalidad de conocer si existen diferencias significativas entre los sitos del presente estudio.

Resultados

Objetivo 1: Identificar a las especies de coral con mayor afectación por blanqueamiento en los sitios evaluados.

Las especies afectadas por el blanqueamiento fueron cuatro: *Agaricia agaricites*, *Montastraea annularis*, *Montastraea faveolata* y *Montastraea franksi*. La más impactada fue *O. annularis*, con 9 colonias blanqueadas de un total de 63 registradas *in situ*. Le siguió *A. agaricites*, con 7 colonias afectadas de 104. En contraste, *O. faveolata* y *O. franksi* presentaron solo una colonia blanqueada cada una; ambas fueron observadas únicamente en el sitio frente al hotel Arenas (Figura 4).

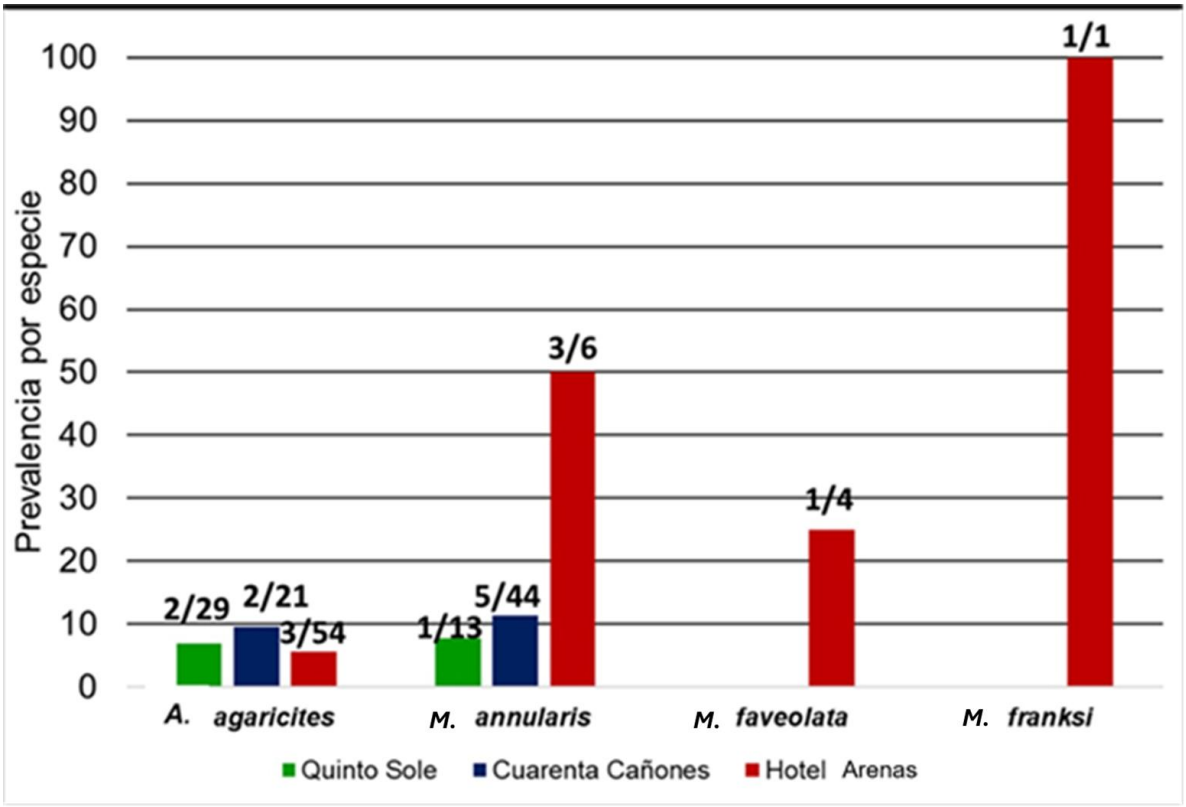


Figura 4: gráfico de barras donde se muestra el número de colonias afectadas por blanqueamiento en cada una de las especies afectadas por sitio. Los números sobre las barras indican la cantidad de colonias afectadas y el número abajo de la barra la cantidad total de colonias registradas para cada sitio. La barra correspondiente a M. franksi es más alta en la representación gráfica debido a que solo se registró una colonia, la cual presentó blanqueamiento.

Objetivo 2: Determinar y comparar los niveles de blanqueamiento en los tres sitios de muestreo.

Los porcentajes de blanqueamiento registrados durante el muestreo de 2021 fueron bajos. La prevalencia promedio en el arrecife de Mahahual fue de 4.79%. El sitio frente al hotel Quinto Sole presentó la menor prevalencia por blanqueamiento coralino, con un 2.38%, seguido por el sitio frente al hotel 40 Cañones, donde se observó un 6.67%. El sector con mayor afectación fue el ubicado frente al hotel Arenas, con un 8.89% de colonias afectadas.

El ANOSIM indicó que los niveles de prevalencia de blanqueamiento entre los tres sitios no representaron diferencias significativas con una ($R=0.037$, $p=0.52$).

Objetivo 3: establecer el tamaño de las colonias de coral afectadas en los sitios muestreados.

Las colonias de talla pequeña fueron las más afectadas por el blanqueamiento coralino (figura 5), seguidas por las de tamaño mediano, mientras que solo dos colonias de tamaño grande presentaron blanqueamiento.

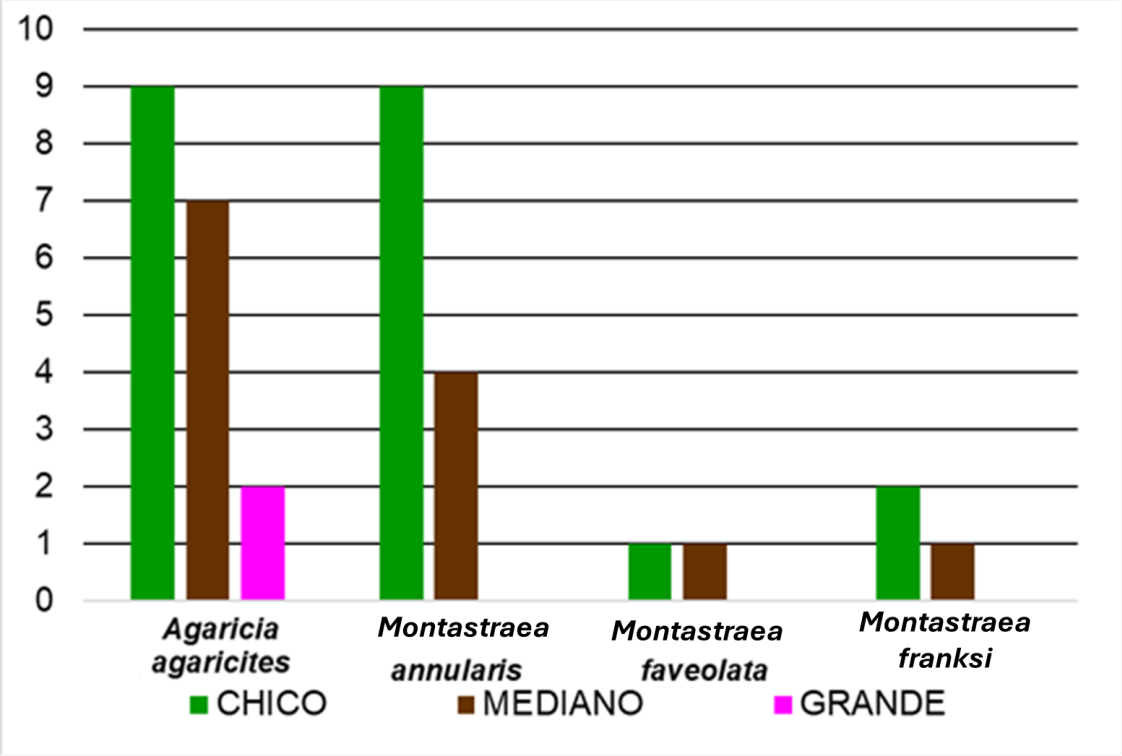


Figura 5: gráfico de barras donde se muestran los tamaños de las colonias afectadas por blanqueamiento coralino en los tres sitios muestreados del arrecife de la localidad de Mahahual Quintana Roo

Objetivo 4: determinar las semejanzas en la estructura comunitaria de los corales entre sitios

En el dendograma resultado de la matriz de las coberturas coralinas (matriz 2) se observa que no se forman grupos verdaderos (resultado de la prueba SIMPROF; figura 6), por lo que no existen diferencias significativas en la estructura comunitaria para los corales pétreos en los tres sitios muestreados en el arrecife de Mahahual.

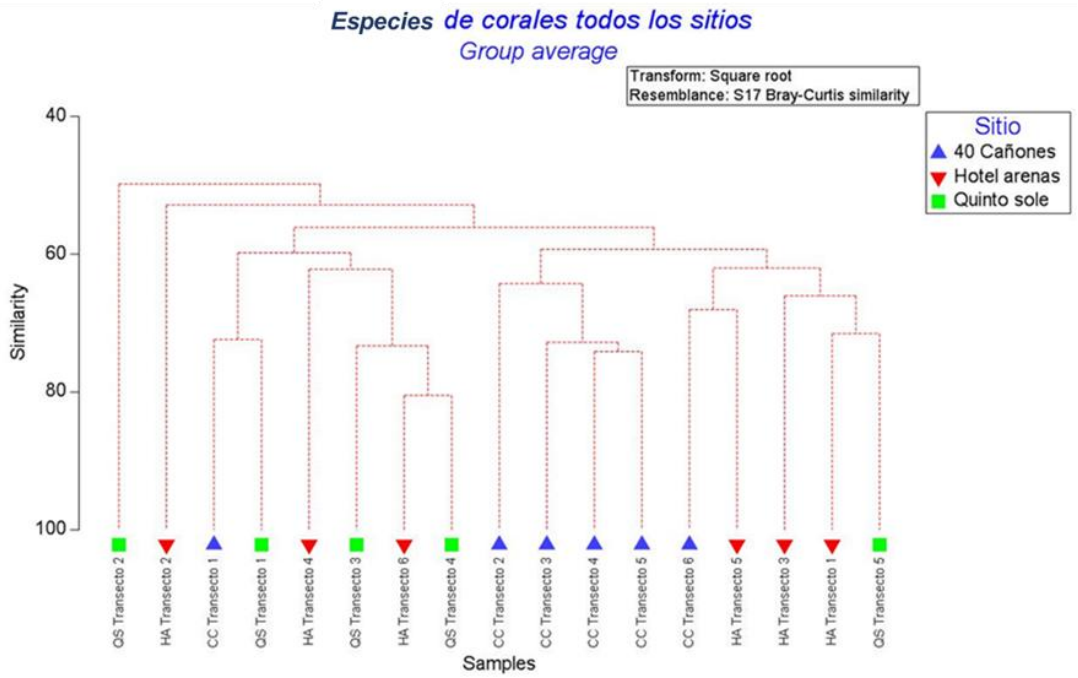


Figura 6: Dendograma que compara las estructuras comunitarias de todas las especies de corales encontradas cubriendo los transectos de los tres sitios en el arrecife de Mahahual Quintana Roo. ~~El color rojo de las líneas indica que los grupos formados no tiene significancia estadística~~

Un análisis de similitudes (ANOSIM) aplicado a la misma matriz de datos de la que se generó el dendograma (figura 6) confirmó que no existen diferencias significativas entre las estructuras comunitarias de todas las especies de corales identificadas en los sitios (R= 0.125; p= 0.09).

Se identificaron 26 especies de corales pétreos en los sitios muestreados y según la gráfica de sombras, las especies con mayores coberturas en todos los sitios fueron *Agaricia agaricites*, *Montastraea faveolata* y *Porites astreoides* (figura 7).



Figura 7: Gráfico de sombras para las especies de corales encontradas en cada transecto de los tres sitios muestreados del arrecife de Mahahual Quintana Roo Muestra a las especies de corales identificadas en los fotogramas de los vídeos realizados en los transectos muestreos del arrecife frente a Mahahual Quintana Roo. En la parte superior de la figura se observa el número de los transectos y el sitio al que pertenecen mientras que del lado izquierdo se observan las especies registradas. Abreviaturas: CC= Cuarenta Cañones HA= hotel Arenas QS= Quinto Sole

Objetivo 5: establecer la diversidad de corales y probar si existen diferencias significativas entre sitios.

El índice de Shanon-Weiner indicó que la diversidad del sitio ubicado frente al hotel Arenas fue de 2.3139 y 1.8259 respecto a los hoteles Quinto Sole y 40 Cañones, mientras que la diversidad entre los sitios Quinto Sole y 40 Cañones fue de 1. 8877. La diversidad del sitio hotel Arenas es mayor en comparación a las diversidades de los otros sitios (tabla 1).

Tabla 1: Tabla triangular obtenida después de realizar el índice de Shannon-Wiener. Los valores en la esquina superior de la diagonal corresponden a los valores t, mientras que en la esquina inferior se aprecian los valores p.

	Quinto Sole	Cuarenta Cañones	Hotel Arenas
Quinto Sole	-	-0.62695	**4.9661**
Cuarenta Cañones	0.53092	-	**-5.3963**
Hotel Arenas	0.000	0.000	-

Objetivo 6: Agrupar a los organismos identificados en grandes grupos morfofuncionales para compararlos entre sitios

El dendrograma y el análisis SIMPROF, basados en los datos de los grandes grupos morfofuncionales por sitio, mostraron la formación de dos grupos verdaderos. El primero incluye todos los transectos del sitio frente al hotel 40 Cañones y el primer transecto del hotel Quinto Sole, los cuales en campo presentaron una alta abundancia de algas coralinas. El segundo grupo comprende los transectos restantes del sitio Quinto Sole y todos los correspondientes al hotel Arenas (Figura 8).

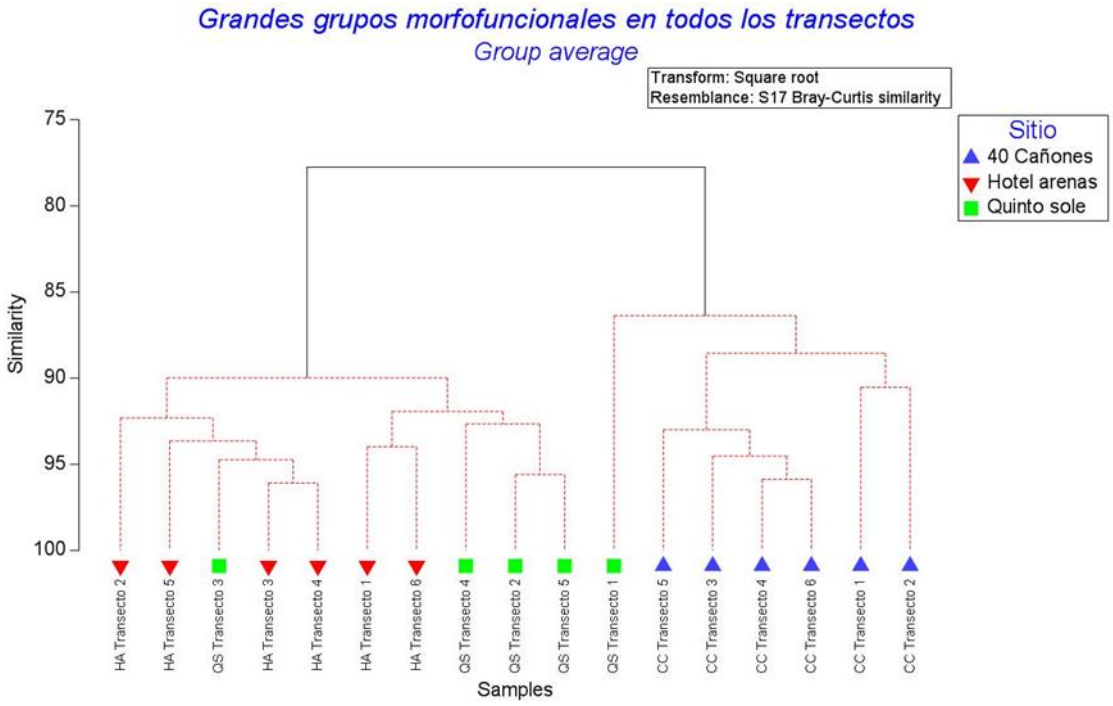


Figura 8: que muestra los niveles de similitud entre los transectos de los sitos analizados. Las líneas negras indican la existencia de grupos con significancia estadística después de aplicar la prueba SIMPROF. Abreviaturas: QS= hotel Quinto Sole CC= hotel Cuarenta Cañones HA= hotel Arenas

El gráfico de sombras, elaborado a partir de la agrupación de los organismos en grandes grupos morfofuncionales (figura 9), muestra que las algas coralinas presentaron una frecuencia notablemente mayor en los seis transectos del sitio frente al hotel 40 Cañones, en comparación

con los demás sitios. Asimismo, en los sitios frente a los hoteles Arenas y Quinto Sole, la frecuencia de algas fue alta (figura 9).

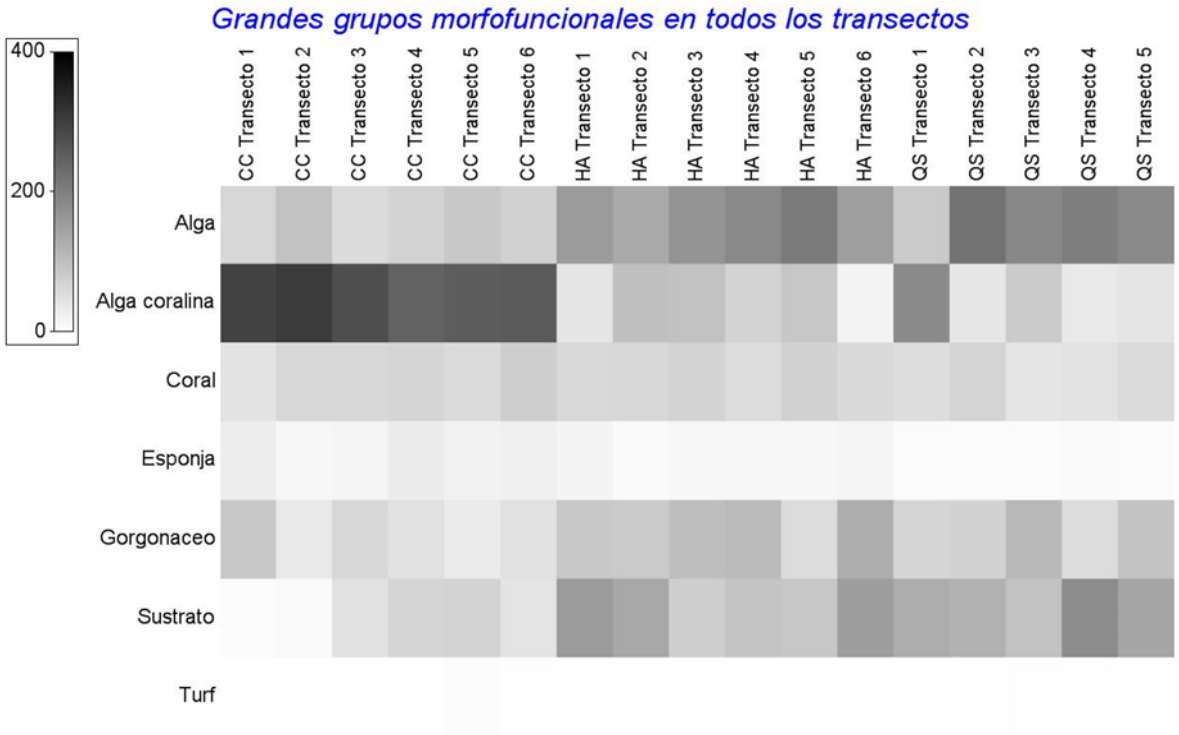


Figura 9: El Shadow plot presenta de manera cualitativa la abundancia de cada grupo morfofuncional en los transectos realizados en los sitios estudiados del arrecife de Mahahual, Quintana Roo. Abreviaturas: Abreviaturas: CC= Cuarenta Cañones HA= hotel Arenas QS= Quinto Sole

La siguiente tabla (tabla 2) muestra los porcentajes de cada gran grupo morfofuncional encontrado en los tres sitios muestreado del arrecife en Mahahual.

GGMF	Quinto Sole	Cuarenta Cañones	Arenas
Alga	33.6%	14.2%	32.0%
Alga coralina	14.5%	52.3%	13.1%
Coral	10.0%	11.8%	11.9%
Esponja	1.3%	4.2%	2.5%
Gorgonaceo	15.1%	9.8%	17.9%
Sustrato	25.5%	7.5%	22.5%
Turf	0.1%	0.2%	0.1%

Tabla2: Tabla de porcentajes correspondiente a cada gran grupo morfofuncional en los tres sitios muestreados.

La comparación de las coberturas de los corales entre los sitios muestreados mediante una prueba ANOVA mostró que no había diferencias significativas ($p=0.178$) entre sitios, mientras que la comparación de la cobertura de las algas entre sitios del arrecife sí ($p<0.001$). Los contrastes a posteriori indicaron que el sitio ubicado frente al hotel 40 Cañones fue el que presentó coberturas algales significativamente menores frente a los otros dos sitos.

Discusión

Sobre las prevalencias de blanqueamiento por sitios

La prevalencia de blanqueamiento coralino registrada en este estudio durante septiembre del año 2021 para el arrecife de Mahahual en promedio fue de 4.79%, este porcentaje fue menor al reportado en el trabajo de McField et al. (2005), en el cual reportaron una prevalencia de 23% para este mismo arrecife. Esto podría estar relacionado con la pérdida de cobertura coralina que ha registrado este arrecife; Mex-novelo et al. (2021). Reportaron que en el arrecife de Mahahual hubo una cobertura coralina de 8.7%, este porcentaje fue 22% menor en comparación a 1998 en la misma localidad evidenciando la pérdida de la cobertura coralina en el sitio.

Las prevalencias de blanqueamiento coralino entre los sitios muestreados no mostraron diferencias significativas. Esta homogeneidad puede atribuirse al aumento en la frecuencia y extensión espacial de los eventos de blanqueamiento en la actualidad. Desde 1990, Williams y Bunkley-Williams pronosticaban que estos eventos ocurrirían de forma cíclica cada tres o cuatro años, afectando regiones completas en lugar de áreas confinadas, lo que reduciría el tiempo disponible para la recuperación del ecosistema. Esta predicción coincide con lo reportado por Eakin et al. (2019), cuando documentaron que entre 2014 y 2017 el blanqueamiento tuvo una distribución geográfica amplia y persistente durante varios meses. El estudio concluye que el aumento en la intensidad de las ondas de calor marinas ha incrementado tanto la frecuencia como la severidad de estos eventos, los cuales ya no ocurren cada 20 o 30 años, como en la década de 1980, sino en intervalos de menos de seis años, como sucede actualmente.

Las coberturas de coral en los transectos de los sitios muestreados no presentaron diferencias significativas. Esto podría deberse a que los tres sitios tienen condiciones similares, además de que muy probablemente las colonias no han tenido el tiempo suficiente para recuperarse de eventos adversos recientes. Incluso en arrecifes saludables, las especies de

crecimiento rápido requieren entre 10 y 15 años para lograr una recuperación significativa (Eakin et al., 2019).

El mayor porcentaje de blanqueamiento coralino se registró frente al hotel Arenas, al sur del área de estudio, con un 8.89%. En contraste, el sitio frente al hotel Quinto Sole, ubicado al norte, presentó el valor más bajo con solo un 2.38%, a pesar de haber recibido agua que previamente había pasado por los sitios más afectados. Esto sugiere que, durante el periodo del muestreo, el blanqueamiento no fue provocado por un agente patógeno transportado por corrientes marinas. Adicionalmente, dado que los porcentajes de blanqueamiento no difirieron significativamente entre sitios, se sugiere que las condiciones ambientales son similares en todos los sitos.

El 13 de septiembre de 2021, fecha en que se llevó a cabo el muestreo, el sitio web "Coral Reef Watch" de la NOAA reportó una temperatura superficial del mar de 29.05 °C en la región de estudio. Durante esa semana, se emitió un aviso de blanqueamiento en nivel de "observación" para el Caribe mexicano (Figura 10), lo que refuerza la probabilidad de que toda la zona haya experimentado un nivel similar de estrés térmico.

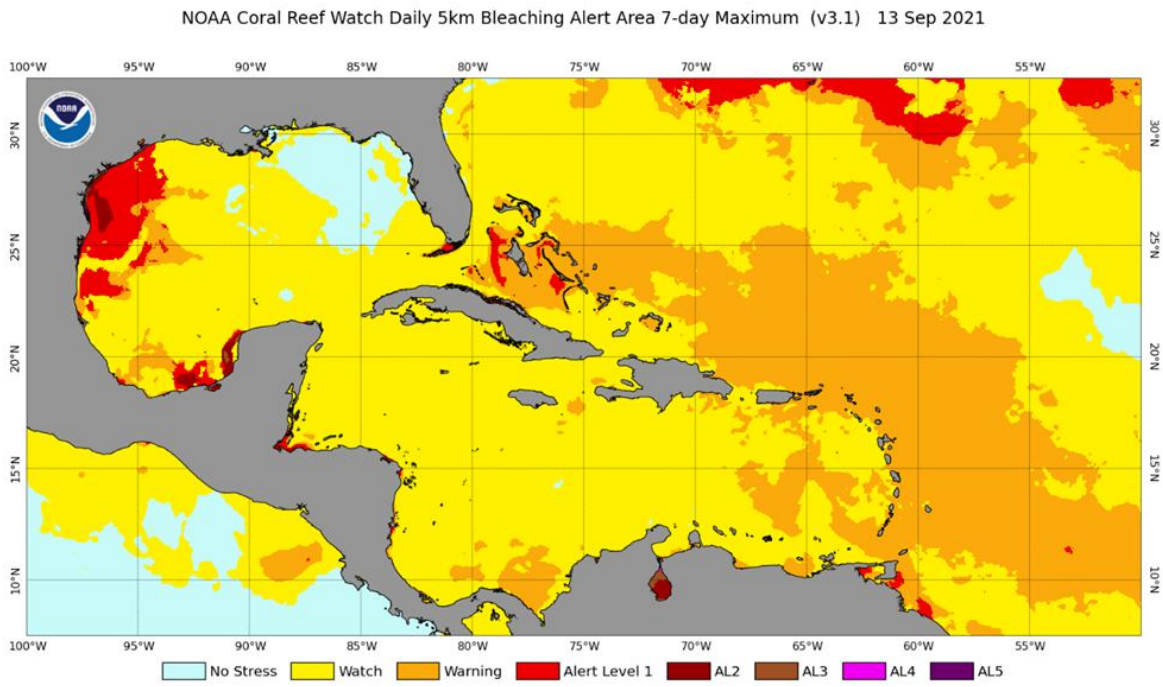


Figura 10: Mapa del caribe que muestra las alertas de por blanqueamiento coralino, diferenciadas por colores en la semana del 13 de septiembre. Durante este periodo Quintana Roo se encontraba bajo condiciones de estrés térmico suficientes para declarar el aviso de "observación". Mapa extraído de: NOAA Coral Reef Watch. 2019, updated daily, recuperado el 09/09/2024 de https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php.

De acuerdo con la interpretación común de los productos de NOAA "Coral Reef Watch", los eventos de blanqueamiento suelen registrarse entre 5 y 14 días posteriores a la emisión de dichas alertas, aunque este intervalo puede variar según las condiciones ambientales locales. Esta información podría explicar por qué los sitios evaluados presentaron una prevalencia de blanqueamiento inferior al 10 % durante la semana del 13 de septiembre. Cabe señalar que el nivel de "observación" no equivale a una "alerta" formal. Aunque la temperatura superficial alcanzó un promedio de 29.05 °C, este valor que si bien puede generar cierto grado de estrés térmico en los corales, no se consideró suficiente para activar una alerta oficial. Por lo tanto, es probable que los efectos del estrés térmico apenas comenzaran a manifestarse en ese momento, lo que también explicaría la similitud en los niveles de blanqueamiento observados entre las especies afectadas.

Sobre las especies identificadas

Ruiz-Zárate et al. (2003), reportaron que las especies de corales escleractíneos con mayor presencia en el arrecife de Mahahual durante el muestreo de 1999 fueron *Montastraea annularis*, *Montastraea faveolata* y *Montastraea cavernosa*. En el presente estudio (2021), *O. annularis* se mantuvo como una de las especies más abundantes, lo que sugiere que ha logrado mantener una población estable a pesar de los efectos del blanqueamiento coralino. En contraste, *O. faveolata* presentó una menor abundancia, lo que podría indicar una disminución poblacional en el arrecife de Mahahual.

No se encontraron diferencias significativas en la estructura comunitaria de los corales pétreos entre los tres sitios muestreados en el arrecife de Mahahual. Este resultado podría explicarse, como señaló Loya (2001), por la mayor capacidad de supervivencia y recuperación que presentan las especies de crecimiento masivo e incrustante tras eventos de blanqueamiento coralino, como se evidenció en el evento de 1998 en Japón. El autor también indicó que la abundancia de este tipo de corales tiende a incrementarse en sitios afectados por perturbaciones. Esta tendencia parece confirmarse al comparar los resultados del presente estudio (2021) con los de Mex-Novelo et al. (2019), quienes evaluaron cinco ubicaciones del frente arrecifal de Mahahual. En su investigación, las especies con mayor cobertura fueron *Agaricia agaricites* (2.35 %), *Montastraea annularis* (1.38 %) y *Porites astreoides* (1.34 %). Mientras que, en el presente estudio las especies con mayor cobertura fueron: *A. agaricites* (0.13 %), *Montastraea faveolata* (0.06 %) y *P. astreoides* (0.05 %). A pesar de la disminución general en la cobertura coralina en 2021, *A. agaricites* se mantuvo como la especie más abundante en ambos estudios, mientras que *P. astreoides* ocupó el tercer lugar en ambos casos. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que las especies encontradas corresponden a aquellas que han logrado persistir frente a las adversidades ambientales que han afectado al ecosistema a lo largo del tiempo.

Loya (2001) señaló que los corales con formas de crecimiento masivo e incrustante presentan mayores probabilidades de sobrevivir y recuperarse tras eventos de blanqueamiento. En el presente estudio, las especies afectadas por blanqueamiento coralino exhiben crecimiento masivo, con excepción de *Agaricia agaricites*, cuya morfología puede variar entre laminar o incrustante en sus etapas tempranas. Durante los transectos realizados, esta especie se observó predominantemente en forma incrustante, lo que sugiere que las especies afectadas podrían tener una mayor probabilidad de recuperación en comparación con otras formas de crecimiento.

Eakin et al. (2019) señalaron que los factores de estrés antropogénico, como la sobrepesca y las descargas de aguas residuales, afectan negativamente la capacidad de los corales para resistir y recuperarse del estrés térmico. Por ello, recomiendan implementar acciones locales, como el establecimiento de áreas marinas protegidas, con el objetivo de reducir el impacto de estos factores y aumentar las probabilidades de recuperación del ecosistema. No obstante, advierten que dichas medidas no son suficientes por sí solas, ya que la solución integral del problema requiere acciones globales frente a la crisis climática.

En este contexto, para la comunidad de Mahahual resulta fundamental desarrollar e implementar estrategias de educación ambiental orientadas a sensibilizar a la población local sobre prácticas que contribuyan a disminuir el estrés antropogénico. Asimismo, es necesario establecer una regulación efectiva del desarrollo urbano, anticipando el crecimiento demográfico. Actualmente, el aumento descontrolado de la población en la región ha derivado en asentamientos irregulares (SIPSE, 2024), muchos de los cuales se ubican en áreas de conservación o protegidas, lo que genera cambios en el uso de suelo y descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado (Ciencia UNAM, 2013).

Sobre los tamaños de las colonias afectadas

La mayoría de las colonias coralinas afectadas por el blanqueamiento eran de tamaño pequeño, mientras que las de mayor tamaño presentaron una menor afectación. Este patrón coincide con los hallazgos de Johnston et al. (2020), quienes concluyeron que la probabilidad de que una colonia experimente blanqueamiento disminuye a medida que aumenta su tamaño. Además, en el presente estudio se observó que la mayoría de las colonias registradas correspondían a tallas pequeñas y medianas.

Rupert y Barnes (1996) señalaron que la relación simbiótica entre las zooxantelas y los corales facilita la formación del esqueleto calcáreo, lo que, a su vez, favorece el crecimiento de la colonia. Cuando esta simbiosis se interrumpe por la expulsión de las algas, la tasa de deposición de carbonato de calcio disminuye en comparación con los corales que mantienen condiciones simbióticas normales. Esto puede causar un crecimiento más lento y por ende, una mayor proporción de colonias de talla reducida.

Otras causas que pueden explicar la predominancia de corales de talla pequeña en un arrecife son la acidificación del agua, que incrementa la descalcificación y dificulta el crecimiento esquelético (Hill & Hoogenboom, 2022), y el cambio de fase coral-alga, fenómeno que ocurre cuando disminuye la cobertura de corales pétreos y aumenta la cobertura de macroalgas. Este cambio puede ser provocado por diversas perturbaciones, tales como huracanes, pérdida de herbívoros, incremento de nutrientes, enfermedades coralinas o eventos de blanqueamiento (McManus & Polsenberg, 2004).

Respecto a la diversidad de los corales y sus diferencias en los sitios

Se observó que la diversidad en el sitio ubicado frente al hotel Arenas, en la zona sur del área de estudio, fue significativamente mayor en comparación con los sitios localizados frente a

los hoteles Quinto Sole y Cuarenta Cañones. La abundante presencia de alga coralina en el sitio Cuarenta Cañones, situado en el centro del área de muestreo, y la abundante presencia de macroalgas registrada en el sitio frente al hotel Quinto Sole, ubicado en el extremo norte de Mahahual, podrían estar relacionados con una disminución de la diversidad en los dos últimos sitios, en comparación con el área frente al hotel Arenas.

Los autores Roff y Mumby (2012) analizaron las diferencias en la resiliencia de los arrecifes al comparar los ecosistemas del Indo-Pacífico con los del Caribe. Los autores plantearon que la mayor diversidad de herbívoros presente en el Indo-Pacífico favorece la resiliencia arrecifal, mientras que en el Caribe existiría una mayor predisposición al crecimiento de macroalgas costrosas. Sin embargo, Arias-González et al. (2017) evidenciaron que el cambio de fase coral-alga en Mahahual no fue provocado por la pérdida de herbívoros, sino por el crecimiento urbano acelerado que experimentó el poblado entre 2000 y 2006, periodo durante el cual se perdieron aproximadamente 85 hectáreas de vegetación y, como consecuencia, 43 hectáreas de cobertura coralina arrecifal. Adicionalmente, el aumento en la afluencia turística contribuyó al incremento en la concentración de nitratos, amonio y fosfatos en el agua, lo cual generó procesos de eutrofización. Esta eutrofización fue identificada por los autores como un factor determinante en el cambio de fase coral-alga, subrayando la urgencia de implementar sistemas adecuados de tratamiento de aguas residuales a la par del crecimiento poblacional.

Sobre los grandes grupos morfofuncionales y las coberturas en los sitios

No se observaron diferencias significativas en la cobertura coralina entre los sitios muestreados. La similitud en la composición del grupo morfofuncional de los corales en toda el área de estudio podría explicarse por lo señalado por Loya et al. (2001), quienes indican que ciertas especies coralinas presentan una mayor probabilidad de sobrevivir tras eventos de

blanqueamiento, lo que eventualmente incrementa su abundancia en las zonas afectadas. Asimismo, McField y Kramer (2017) coincidieron en que, cuando las algas proliferan y dominan un sitio, la mortalidad coralina tiende a incrementarse, lo que puede provocar el declive de la estructura y funcionalidad del arrecife. En este contexto, la cobertura coralina actúa como un indicador clave del estado de salud del ecosistema. Estos hallazgos sugieren que la similitud observada entre los sitios podría deberse a que las especies presentes son aquellas que han logrado persistir a lo largo del tiempo frente a las perturbaciones.

Se identificaron diferencias significativas en la cobertura algal entre los sitios evaluados. En el área frente al hotel Cuarenta Cañones, ubicado en el centro del área de estudio, predominaron las algas coralinas. En contraste, la mayor cobertura de macroalgas verdes se registró en el sitio frente al hotel Quinto Sole, en el sector norte del área.

Los autores McField y Kramer (2007) documentaron las causas que originan las transiciones de arrecifes dominados por corales a aquellos dominados por algas, especialmente algas costrosas y del *turf*. Según los autores, estos cambios en la dominancia suelen estar asociados a factores de estrés como enfermedades, eventos de blanqueamiento, huracanes, sobrepesca, contaminación antropogénica y eutrofización. Las dos últimas causas fueron identificadas en Mahahual por Arias-González et al. (2017), quienes reportaron un crecimiento urbano acelerado y una mayor afluencia turística que contribuyeron a la degradación del arrecife. Estas condiciones promueven el aumento en la cobertura algal y la disminución de los corales. Adicionalmente Chuc-Contreras et al. (2012) registraron la presencia de un desagüe cercano al sector norte del arrecife frente a Mahahual, así como una abundancia considerablemente menor de corales en comparación con las algas presentes en el sitio.

En Mahahual, la corriente marina fluye de sur a norte. En el presente estudio, el sitio ubicado frente al hotel Arenas, en el sector sur, presentó la menor cobertura de macroalgas y algas coralinas. Este patrón sugiere que las zonas ubicadas al sur se encuentran menos expuestas a los efectos de la eutrofización derivada del desarrollo urbano. En contraste, los sectores central y norte del área de estudio podrían estar más afectados por el arrastre de nutrientes como nitratos, amonio y fosfatos, transportados por la corriente costera. Esta dinámica explicaría la mayor cobertura algal observada en los sitios frente a los hoteles Cuarenta Cañones (centro) y Quinto Sole (norte), en comparación con el sitio sur.

En este estudio se formaron grupos verdaderos entre los sitios muestreados cuando se usaron los porcentajes de cobertura de los grandes grupos morfofucnionales. Esto se podría explicar dado que el sitio frente al hotel Cuarenta Cañones presentó una presencia mayor de alga coralina, lo que provocó que todos sus transectos quedaran agrupados por separado. Esto lo distingue claramente de los otros sitios, donde la abundancia de este grupo morfofuncional fue menor.

Conclusiones

Las especies que presentaron signos de blanqueamiento en los sitios evaluados fueron *Agaricia agaricites*, *Montastraea faveolata*, *Montastraea franksi* y *Montastraea annularis*, siendo esta última la más afectada. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en las prevalencias de blanqueamiento entre los sitos.

La prevalencia promedio de blanqueamiento coralino registrada en el arrecife de Mahahual, Quintana Roo, fue del 4.79 %. El sitio con menor porcentaje fue el ubicado frente al hotel Quinto Sole (2.38 %), seguido por el hotel 40 Cañones (6.67 %), mientras que el mayor valor se observó en el hotel Arenas, con un 8.89 %. No se encontraron diferencias significativas entre las prevalencias de blanqueamiento en los distintos sitios evaluados.

La mayoría de las colonias afectadas por blanqueamiento correspondieron a individuos de talla pequeña, mientras que las de mayor tamaño presentaron una menor incidencia del fenómeno.

El sitio ubicado frente al hotel Arenas, al sur del área de estudio, presentó la mayor diversidad, difiriendo significativamente con los demás sitios. Esta variación puede atribuirse a que, en el sitio frente al Hotel 40 Cañones ubicado en la zona central del área de estudio, las algas coralinas fueron dominantes en comparación con otros organismos, mientras que en el sitio frente al hotel Quinto Sole, al norte del área de estudio, se registró una mayor cobertura de macroalgas verdes.

En total, se identificaron 26 especies de corales pétreos en los sitios muestreados del arrecife frente a Mahahual, Quintana Roo. No se encontraron diferencias significativas en la cobertura coralina entre los distintos sitios evaluados.

Los grandes grupos morfofuncionales registrados en los tres sitios muestreados presentaron diferencias significativas, principalmente debido a la alta abundancia de algas coralinas en el sitio frente al hotel 40 Cañones, lo que resultó en la formación de un grupo separado respecto a los demás.

Recomendación

En concordancia con lo señalado por otros autores, es fundamental monitorear de forma continua la prevalencia del blanqueamiento, ya que el cambio climático ha provocado un aumento sostenido en la temperatura del océano, generando eventos de blanqueamiento cada vez más frecuentes y acelerados. Esta situación compromete la capacidad de restauración de las colonias de coral, al no contar con el tiempo necesario para su recuperación, lo que puede traducirse en variaciones anuales en los niveles de afectación, incrementos significativos en la prevalencia de blanqueamiento y una contribución directa al ciclo de mortalidad coralina.

Adicionalmente, es necesario que la gobernanza local implemente regulaciones orientadas al control del desarrollo urbano en la región, con el objetivo de promover una expansión planificada que favorezca el desarrollo económico de la comunidad, pero que al mismo tiempo garantice una infraestructura adecuada para satisfacer las necesidades de la población y minimizar los impactos ambientales. Actividades como el desmonte, el despalme y el manejo inadecuado de aguas residuales representan factores locales que inciden directamente en la prevalencia del blanqueamiento. Si bien estas acciones no detienen los efectos globales del cambio climático, como el aumento de la temperatura del mar, sí afectan significativamente la salud del ecosistema arrecifal.

Referencias

Acosta-González, G., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Hernández-Landa, R. C., & Arias-González, J. E. (2013). Additive diversity partitioning of fish in a Caribbean coral reef undergoing shift transition. PLoS One, 8(6), e65665.

Adams, M. S., Demmig-Adams, B., Li, R., Zarate, D., & Li, J. (2020). Coral reef productivity and diversity—Contributions from enhanced photosynthesis via demand for carbohydrate from the host. Marine Ecology, 41(6), e12618.

Alvarez-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.

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), e0174855.

Banaszak, A., Schutter, M., Guendulain García, S., Mendoza Quiroz, S., & Gómez Campo, K. (2018). Guía práctica para la restauración con base en la producción de reclutas sexuales de corales con énfasis en Acropora palmata. Alianza Fundación Carlos Slim.

Brown, B. E. (1997). Coral bleaching: causes and consequences. Coral reefs, 16(1), S129-S138.

Brusca, R. C., & Brusca, G. J. (2003). Invertebrados, segunda edición: Madrid. España,Universidad Complutense de Madrid, Editorial McGraw Hill interamericana

Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., & Carriquiry, J. D. (2007). El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. Carbono en ecosistemas acuaticos de México. SEMARNAT/INE, CICESE, México, 215-226.

Cesar, H. S. J., Burke, L., & Pet-Soede, L. (2003). The economics of worldwide coral reef.

Chuc-Contreras, A., Ortegon-Aznar, I., Tuyub-Mota, A., & Suárez-Salazar, J. (2012). Cambio de fase coral-algas en el Arrecife de coral de Mahahual, en el Caribe Mexicano.

Ciencia UNAM (2013) Asentamientos irregulares deterioran el ambiente. Recuperado de https://ciencia.unam.mx/leer/233/asentamientos_irregulares_deterioran_el_ambiente.

Clarke, K. & Gorley R. (2015). Primer v7 User Manual/Tutorial (1a ed) https://www.researchgate.net/profile/Minhuang_Wang/post/PDF_of_PRIMERs_Methods_Manual/attachment/5a6fe450b53d2f0bba4e9eea/AS:588339111559173@1517282383487/download/PRIMER7_Users'+Methods+manual+v7.pdf

Eakin, C. M., Morgan, J. A., Heron, S. F., Smith, T. B., Liu, G., Alvarez-Filip, L., ... & Yusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. PloS one, 5(11), e13969

Eakin, C. M., Sweatman, H., & Brainard, R. E. (2019). The 2014–2017 global-scale coral bleaching event: insights and impacts. Coral Reefs, 38(4), 539-545.

Glynn, P. W., Peters, E. C., & Muscatine, L. (1985). Coral tissue microstructure and necrosis: relation to catastrophic coral mortality in Panama. Dis Aquat Org, 1, 29-37.

Glynn, P. W. (1993). Coral reef bleaching: ecological perspectives. Coral reefs, 12(1), 1-17.

Grupo SIPSE (2024) Bacalar y Mahahual, las zonas más invadidas de Quintana Roo. Recuperado de https://sipse.com/novedades/bacalar-y-mahahual-las-zonas-mas-invadidas-de-quintana-roo-469008.html

Hernández, E., Aguirre, N., Palacio, K., Palacio, J., Ramírez, J., Duque, S., ... & Kruk, C. (2020). Clasificación de grupos morfofuncionales del fitoplancton en seis sistemas lénticos de las regiones Caribe, Andina y Amazónica de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 44(171), 392-406.

Hill, T. S., & Hoogenboom, M. O. (2022). The indirect effects of ocean acidification on corals and coral communities. Coral Reefs, 41(6), 1557-1583.

Humann, P., & Deloach, N. (2008). Reef coral identification Florida, Caribbean, Bahamas, segunda edición. New World Publications.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9

Jameson, S. C., Erdmann, M. V., Karr, J. R., & Potts, K. W. (2001). Charting a course toward diagnostic monitoring: a continuing review of coral reef attributes and a research strategy for creating coral reef indexes of biotic integrity. Bulletin of Marine Science, 69(2), 701-744.

Johnston, E. C., Counsell, C. W., Sale, T. L., Burgess, S. C., & Toonen, R. J. (2020). The legacy of stress: Coral bleaching impacts reproduction years later. Functional Ecology, 34(11), 2315-2325.

Kohler, K. E., & Gill, S. M. (2006). Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. Computers & geosciences, 32(9), 1259-1269.

Lang, J., Marks, K., Kramer, P., Kramer, P., & Ginsburg, R. (2010). AGRRA protocols version 5.4. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program, Florida, USA, 1-31.

Loya, Y., Sakai, K., Yamazato, K., Nakano, Y., Sambali, H., & Van Woesik, R. (2001). Coral bleaching: the winners and the losers. Ecology letters, 4(2), 122-131.

Manabe, S., Stouffer, R. J., Spelman, M. J., & Bryan, K. (1991). Transient responses of a coupled ocean–atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO2. Part I. Annual mean response. Journal of Climate, 4(8), 785-818.

McField, M., Bood, N., Fonseca, A., Arrivillaga, A., Franquesa R., & Loreto-Viruel, R. (2005). Status of the Mesoamerican Reef after the 2005 coral bleaching event. Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in, 45-60.

McField, M., & Kramer, P. (2007). Healthy reefs for healthy people: a guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican Reef Region. Smithsonian Institution, Washington, DC, EEUU, 208.

McManus, J. W., & Polsenberg, J. F. (2004). Coral–algal phase shifts on coral reefs: ecological and environmental aspects. *Progress in Oceanography*, *60*(2-4), 263-279.

Mex-Novelo, M., J. (2021). Estructura de la comunidad coralina en el frente arrecifal de Mahahual, Quintana Roo, México. Tesis de maestría en manejo de zona costera. Instituto Tecnológico de Chetumal.

Mitchell, J. (1988). Local effects of greenhouse gases. Nature, 332, 399-400.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). NOAA Coral Reef Watch version 3.1 daily 5km satellite regional virtual station time series data for Southeast Florida, March 12, 2013 – March 11, 2014. NOAA Coral Reef Watch. https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025). Current global bleaching: Status update & data submission. NOAA Coral Reef Watch. https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/research/coral_bleaching_report.php

Potts, D., & Garthwaite, R. (1991). Evolution of reef-building corals during periods of rapid global change. The unity of evolutionary biology, 1, 170-178.

Rendis, A. M., Acosta González, G., Hernández-Stefanoni, J. L., & Arias González, J. E. (2016). Quantifying the reefscape transformation of a coastal Caribbean coral reef during a phase shift and the associated coastal landscape change. Marine Ecology, 37(3), 697-710.

Roff, G., & Mumby, P. (2012). Global disparity in the resilience of coral reefs. Trends in ecology & evolution, 27(7), 404-413.

Ruiz-Moreno, D., Willis, B. L., Page, A. C., Weil, E., Cróquer, A., Vargas-Angel, B., ... & Harvell, C. D. (2012). Global coral disease prevalence associated with sea temperature anomalies and local factors. Diseases of aquatic organisms, 100(3), 249-261.

Ruiz-Zarate, M. A., Hernandez-Landa, R. C., Gonzalez-Salas, C., Nunez-Lara, E., & Arias-Gonzalez, J. E. (2003). Mexico. Condition of Coral Reef Ecosystems in Central-Southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Stony Corals and Algae). Atoll Research Bulletin.

Ruppert, E. E., & Barnes, R. D. (1996). Zoología de los Invertebrados, sexta edición: Madrid. España, Universidad Complutense de Madrid, Editorial McGraw Hill interamericana.

Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable. (2018). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población Mahahual. Recuperado de https://oportunidadesquintanaroo.com/wp-content/uploads/2021/07/PDUCP-Mahahual-Perio%CC%81dico-Oficial-del-Estado-7-Jul-2021.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano. Recuperado de http://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-caribe-mexicano-154642.

Sheppard, C. (2022). Coralpedia: your guide to Caribbean corals and sponges. Recuperado 19 de https://coralpedia.bio.warwick.ac.uk/en

Smith, K. M., Payton, T. G., Sims, R. J., Stroud, C. S., Jeanes, R. C., Hyatt, T. B., & Childress, M. J. (2019). Impacts of consecutive bleaching events and local algal abundance on transplanted coral colonies in the Florida Keys. Coral Reefs, 38, 851-861.

Sosa-Ferreira, A., & Martinez, C. (2016). El turismo de cruceros y la transformación del paisaje: Majahual, México. El periplo sustentable, (31).

Vázquez, J. (2023) Quintana Roo capta al 60% de todos los turistas de cruceros a nivel nacional. El Economista. Recuperado el 20 de agosto del 2023 de https://www.eleconomista.com.mx/estados/Quintana-Roo-capta-al-60-de-todos-los-turistas-de-cruceros-a-nivel-nacional-20230614-0070.html

Vásquez-Yeomans, L., Ordóñez-López, U., & Sosa-Cordero, E. (1998). Fish larvae adjacent to a coral reef in the western Caribbean Sea off Mahahual, Mexico. Bulletin of Marine Science, 62(1), 229-245

Vizcarra, G. A., Zárate, M. Á. R., Aguilera, L. C., Ortíz, E. C., Magaña, A. C., De Jesús-Navarrete, A., ... & Ganivet, J. P. C. (2008). La importancia de los arrecifes del coral en México. Ecofronteras, 2-5.

Wear, S. L., & Thurber, R. V. (2015). Sewage pollution: mitigation is key for coral reef stewardship. Annals of the New York Academy of Sciences, 1355(1), 15-30.

Williams Jr, E. H., & Bunkley-Williams, L. (1990). The world-wide coral reef bleaching cycle and related sources of coral mortality. Atoll research bulletin.