



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

“Fauna (peces y moluscos) asociada a arrecifes de coral de la zona centro y norte del Caribe mexicano”

Tesis que presenta

Biól. Jaime Alejo Pérez Torres

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo 2021

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____

Nombre: Jaime Alejo Pérez Torres

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE
YUCATÁN, A. C. POSGRADO EN CIENCIAS DEL
AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Jaime Alejo Pérez Torres titulado ***“Caracterización de la fauna (peces y moluscos) asociada a arrecifes de coral de la zona centro y norte del Caribe mexicano”*** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, Ecología y Dinámica de Ecosistemas Acuáticos, Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Organismos Acuáticos (LEBOA) del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. José Adán Caballero Vázquez y del Dr. Gilberto Acosta, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del agua de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 2 de junio de 2021

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de esta investigación (Número de becario 733789).

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán CICY, Unidad de Ciencias del Agua y laboratorio de Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Organismos Acuáticos (LEBOA) por todo el apoyo y por mi formación académica.

Al Dr. José Adán Caballero Vázquez por dirigir mi tesis, por compartirme de sus conocimientos y siempre apoyarme.

Al Dr. Gilberto Acosta González por unirse como codirector de mi trabajo de tesis, apoyarme con comentarios y preocuparse por el equipo de trabajo.

Al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa por aceptarme en su laboratorio, por enseñarme a trabajar con profesionalismo y guiarme en aspectos importantes de este trabajo.

A la Dra. Jazmín Deneb Ortigosa por aceptar ser mi asesora, por el tiempo dedicado a mejorar mi trabajo y a su amistad.

Al Dr. Carlos González Salas por revisar mi tesis y formar parte de mi comité.

Al Dr. Antonio Almazán por sus valiosos consejos y toda su ayuda.

Al personal del CICY por hacer posible este trabajo. A los técnicos, el M. es C. Jorge Peniche por su apoyo en campo y por la ayuda en la identificación los peces, la Químico Daniela Ortega por su apoyo para realizar el trabajo de laboratorio y sus comentarios positivos y el M. en C. Benjamín por su apoyo en campo y por facilitarme el uso del microscopio estereoscópico, y también agradezco a los tres por sus valiosos consejos que me ayudaron a mejorar como persona.

A mis compañeros Arturo, Irving, Dilsa, Yesenia, José Carlos y Yasmín, por compartir conmigo esta etapa y por darme su amistad.

Dedicatorias:

Les dedico este trabajo a mis padres Arnulfo y Guadalupe y a mis hermanos Adrian y Nelly, que siempre me han apoyado y con su amor no me dejan caer. A la pequeña Adriana “Juana Banana” que nos ha hecho luchar por un mejor futuro. A mi hermosa Pamela por su amor y apoyo en todo momento.

<<Todo hombre sabio teme tres cosas: la tormenta en el mar, la noche sin luna y la ira de hombre amable>> Patrick Rothfuss

Lista de tablas

Capítulo 1

Tabla 1. Estudios sobre peces realizados en el Caribe mexicano.....	6
---	---

Capítulo 2

Tabla 2. Nutrientes disueltos y método para medirlo en espectrofotometría.....	17
--	----

Capítulo 3

Tabla 3. Valores de los nutrientes del agua en los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	25
--	----

Tabla 4. Análisis comparativo de los valores con otros estudios en Quintana Roo.....	27
--	----

Tabla 5. Variables indirectas en la calidad del agua de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	28
---	----

Tabla 6 Índice de calidad de agua TRIX por localidad. En verde se presenta un estado eutrófico, amarillo mesotrófico y rojo oligotrófico.....	28
---	----

Tabla 7. Índice de calidad de agua TRIX por sitio. En verde se presenta un estado eutrófico, amarillo mesotrófico y rojo oligotrófico.....	30
--	----

Tabla 8. Abundancia de peces por localidad del centro y norte de Quintana Roo. Se indica la familia, la especie y el número de organismos registrados por sitios, así como la importancia de las especies registradas: acuario (A), pesca artesanal de poco impacto o local (PA), pesca comercial de alto impacto o industrial (PC) e importancia ecológica (E).....	36
--	----

Tabla 9. Análisis SIMPER de las especies que contribuyen con más de un 70% a las diferencias por localidad de peces.....	45
--	----

Tabla 10. Análisis de diversidad de peces por localidad de la zona centro y norte de Quintana Roo. La abundancia representa el número de organismos y la riqueza en número de especies.....	47
---	----

Tabla 11. Análisis comparativo de t de Hutchenson con los valores de diversidad de Shannon-Wienes (bist/ind) de peces entre localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo. Tc (t calculada) y p (valor de significancia).....	47
Tabla 12. Valores de índices taxonómicos de los peces en la zona centro y norte de Quintana Roo	48
Tabla 13. Diversidad de peces registrados por sitio en la zona centro y norte de Quintana Roo. La abundancia representa el número de organismos y la riqueza en número de especies. Descirbiri Shannon y Pielou.....	49
Tabla 14. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de peces del centro y norte de Quintana Roo.....	51
Tabla 15. Abundancia de moluscos por localidad en la zona centro y norte de Quintana Roo.....	53
Tabla 16. Análisis SIMPER de las especies que contribuyen con más de un 70% a las diferencias por localidad de moluscos	58
Tabla 17. Valores de diversidad de moluscos por localidades en la zona centro y norte de Quintana Roo	60
Tabla 18. Análisis comparativo de t de Hutchenson con los valores de diversidad de Shannon-Wienes (bist/ind) de moluscos entre localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo. Tt (T calculada), Tc (grados de libertad) y p (valor de significancia).....	60
Tabla 19. Valores de los índices taxonómicos para la comunidad de moluscos por localidad.....	61
Tabla 20. Diversidad espacial de moluscos por sitio para la zona centro y norte de Quintana Roo	62
Tabla 21. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMADISP para moluscos del centro y norte de Quintana Roo	63
Tabla 22. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos del centro y norte de Quintana Roo.....	64

Tabla 23. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos y peces del centro y norte de Quintana Roo.....	66
Tabla 24. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de peces y nitratos y clorofila como factores en centro y norte de Quintana Roo.....	67
Tabla 25. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos y nitratos y clorofila como factores en centro y norte de Quintana Roo.....	67

Índice de figuras.

Capítulo 2

Figura 1. Ecorregiones marinas en la zona del Atlántico mexicano (tomado de Wilkinson et al., 2009).....	10
Figura 2. Sistema Arrecifal Mesoamericano. (SEMARNAT, 2006).....	11
Figura 3. Áreas Naturales Protegidas en México, resaltando el centro y norte del estado Quintana Roo (Generado en http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/).....	12
Figura 4. Sitios de muestreo de los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	14
Figura 5. Diagrama de censos visuales para peces y muestreo de moluscos.....	16

Capítulo 3

Figura 6. Nutrientes (sin el registro de clorofila) en los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	26
Figura 7. Calidad del agua de los sitios del centro y norte de Quintana Roo. En verde alta calidad y en amarillo buena calidad (Tomado de Google earth).....	30
Figura 8. Calidad del agua de las localidades del centro y norte de Quintana Roo. En verde alta calidad y en amarillo buena calidad (Tomado de Google earth).....	30
Figura 9. Grupos funcionales en la zona centro y norte de Quintana Roo.....	30
Figura 10. Gráfica de cajas y bigotes del porcentaje de cobertura de corales (a) y macroalgas (b).....	32
Figura 11. Cobertura de corales en la localidad de Punta Nizuc.....	33
Figura 12. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Playa del Carmen.....	33

Figura 13. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Akumal.....	34
Figura 14. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Punta Nizuc.....	34
Figura 15. Porcentaje de grupos funcionales para los sitios de la región de centro y norte de Quintana Roo.....	35
Figura 16. Grupos funcionales de algas para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo	36
Figura 17. Índices de rarefacción de la riqueza de especies de peces para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	41
Figura 18. Familias de peces registrados para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	42
Figura 19. Hábitos alimenticios de los peces registrados en la zona centro y norte de Quintana Roo.....	43
Figura 20. Análisis de componentes principales (PCO) con similitud de BrayCurtis de abundancias de peces para la zona centro y norte de Quintana Roo. Azul=Tulum, rojo=Akumal, verde=Playa del Carmen y morado=Punta Nizuc.....	50
Figura 21. Análisis de escalamiento multidimensional (nMDS) no métrico por similitud de Bray Curtis de la comunidad de peces.....	51
Figura 22. Análisis de correspondencias canónicas (CCA) con las especies dominantes para el grupo de los peces y los nutrientes.....	52
Figura 23. Curvas de rarefacción con la riqueza de especies de moluscos para la zona centro y norte de Quintana Roo.....	56
Figura 24. Número de especies por familia de moluscos en las localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo.....	57

Figura 25. Análisis de componentes principales (PCO) con similitud de BrayCurtis con abundancias de moluscos del centro y norte de Quintana Roo. 1 (a, b, c, d, e, f, g)=Tulum, 2 (a, b, c, d, e, f)=Akumal, 3 (a, b, c)=Playa del Carmen y morado (a, b, c)=Punta Nizuc.....	63
Figura 26. Análisis de escalamiento multidimensional (nMDS) no métrico por similitud de Bray Curtis de la comunidad de moluscos.....	64
Figura 27. Análisis de correspondencias canónicas (CCA) con las especies dominantes del grupo de los moluscos y los nutrientes.....	65
Figura 28. Gráfica apilada de diversidad de fauna y calidad del agua.....	68
Figura 29. Relación entre la abundancia de peces herbívoros y el porcentaje de la cobertura de macroalgas.....	69
Figura 30. Regresión lineal de herbívoros y cobertura de macroalgas en el centro y norte de Quintana Roo. $r = -0.3$	69

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
2. ANTECEDENTES.....	4
3. JUSTIFICACIÓN.....	8
3. HIPÓTESIS.....	8
4. OBJETIVO GENERAL.....	8
4.1. OBJETIVOS PARTICULARES.....	8
CAPÍTULO 2	
5. ÁREA DE ESTUDIO.....	10
5.1. REGIÓN DEL CARIBE MEXICANO.....	11
5.4. CLIMA.....	12
5.5. HIDROGEOLOGÍA.....	13
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
6.1. DISEÑO DE MUESTREO.....	13
6.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	13
6.3 TRABAJO EN CAMPO.....	14
6.3. TRABAJO DE LABORATORIO.....	16
6.4. TRABAJO DE GABINETE.....	17
CAPÍTULO 3	
7. RESULTADOS.....	24
7.1. CALIDAD DEL AGUA.....	24
7.2. ANÁLISIS DEL BENTOS ARRECIFAL.....	31
7.3. PECES DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	36

7.4. MOLUSCOS DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	53
7.5. PECES Y MOLUSCOS.....	65
8. DISCUSIÓN.....	70
8.1 CALIDAD DEL AGUA.....	70
8.2. BENTOS ARRECIFAL.....	76
8.3. PECES.....	82
8.4. MOLUSCOS.....	90
8.5. ECOLOGÍA DEL NORTE Y CENTRO DEL CARIBE MEXICANO.....	96
9. CONCLUSIONES.....	99
10. BIBLIOGRAFÍA.....	101
11. ANEXOS 1. COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	115
11.1. ANEXOS 2. CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EXPRESADOS EN MICROMOL.....	116
11.2. ANEXOS 3. SISTEMÁTICA DE CORALES DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	117
11.3 ANEXOS 4. SISTEMÁTICA DE ESPECIES DE MACROALGAS DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	119
11.4 ANEXOS 5. SISTEMÁTICA DE PECES DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	121
11.5 ANEXOS 6. NUEVOS REGISTROS DE PECES.....	125
11.6 ANEXOS 7. SISTEMÁTICA DE MOLUSCOS DEL CENTRO Y NORTE DE QUINTANA ROO.....	127
11.7 ANEXOS 8. NUEVOS REGISTROS DE ESPECIES DE MOLUSCOS.....	130

RESUMEN

Los arrecifes de coral son ecosistemas con una enorme riqueza y abundancia de organismos de distintos taxones, los cuales se distribuyen en zonas tropicales con bajas concentraciones de nutrientes. En las últimas décadas, su estudio ha tomado relevancia por el incremento en su degradación, que trae como consecuencia afectaciones en el funcionamiento y reducción de su biodiversidad. El objetivo de este trabajo fue el de caracterizar la fauna de peces y moluscos asociada a los arrecifes de coral en la zona centro y norte del Caribe mexicano. Se analizó la condición del agua con el índice de estado trófico TRIX y la composición de los grupos bentónicos, mediante muestreos en cuatro localidades; dos en la zona centro y dos en la zona norte del Caribe mexicano, entre el 2019 y 2020. Las localidades en la zona centro fueron Tulum con siete sitios y Akumal con seis sitios, y las de la zona norte fueron Playa del Carmen y Punta Nizuc ambas con tres sitios. Se registraron 222 especies, 85 especies de peces, 66 de moluscos, 25 de cnidarios y 46 de algas. Como contribución a la actualización de la riqueza del Caribe mexicano, este trabajo reporta al pez *Lutjanus jocu* y catorce especies de moluscos como nuevos registros para la zona centro y norte del Caribe mexicano. En cuanto a la diversidad taxonómica y el índice de Shannon, se determinó que la zona centro del Caribe mexicano mantiene mayor diversidad faunística; la presencia de algunas especies como *Thalassoma bifasciatum*, especies del género *Cerithium* para moluscos, así como la ausencia del coral *Acropora* determinan una mayor degradación en la zona norte del Caribe mexicano. En cuanto a la calidad del agua, se registró que el centro presenta una condición mesotrófica, mientras que el norte tiene una condición eutrófica. Las localidades con menor perturbación fueron Akumal y Tulum, y las localidades más perturbadas de acuerdo al registro de fauna, calidad del agua y características del bentos fueron Playa del Carmen y Punta Nizuc. Dadas las condiciones que mantiene la zona centro del Caribe mexicano, se propone poner especial atención en estas localidades.

Palabras clave: Biodiversidad, peces, moluscos, arrecifes de coral, Caribe mexicano, calidad del agua.

Abstract

Coral reefs are ecosystems with an enormous wealth and abundance of organisms of different taxa, which are distributed in tropical areas with low concentrations of nutrients. In the last decades, this study has become relevant by the increase in its degradation, which affects the functioning and reduction of its biodiversity. The objective of this work was to characterize the fauna of fish and mollusks associated with coral reefs in the central and northern Mexican Caribbean. The condition of the water was analyzed with the TRIX trophic state index and the composition of the benthic groups, through samplings in four localities: two in the central zone and two in the northern zone of the Mexican Caribbean, between 2019 and 2020. The localities in the central zone were Tulum with seven sites and Akumal with six sites, and those in the north were Playa del Carmen and Punta Nizuc both with three sites. A total of 222 species were recorded, 85 species of fish, 66 of mollusks, 25 of cnidarians and 46 of algae. As a contribution to updating the wealth of the Mexican Caribbean, this work reports the *Lutjanus jocu* fish and fourteen species of mollusks as new records for the central and northern Mexican Caribbean. Regarding taxonomic diversity and the Shannon index, it was determined that the central zone of the Mexican Caribbean maintains greater fauna diversity; the presence of some species such as *Thalassoma bifasciatum*, species of the genus *Cerithium* for mollusks, as well as the absence of the *Acropora* coral determine a greater degradation in the northern part of the Mexican Caribbean. Regarding the quality of the water, the center was recorded as having a mesotrophic condition, while the north has a eutrophic condition. The localities with less disturbance were Akumal and Tulum, and the locality most disturbed according to the fauna registry, water quality and characteristics of the benthos were Playa del Carmen and Punta Nizuc. Given the conditions that the central zone of the Mexican Caribbean maintains, it is proposed to pay special attention to these localities.

Keywords: Biodiversity, fish, mollusks, coral reefs, Mexican Caribbean, water quality.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos desempeñan funciones importantes en nuestras vidas, además de proporcionar un hábitat fundamental para las especies, representan una de las principales fuentes de alimentación para los habitantes del mundo (Wilkinson *et al.*, 2009). La mayoría de los ecosistemas marinos son ambientes con alta heterogeneidad y una amplia riqueza de formas de vida, de las que actualmente se pueden encontrar clasificaciones que ayudan a identificar características bióticas y abióticas existentes (Trujillo y Thurman, 2011). Estos ecosistemas presentan ya indicios de un grave desequilibrio ecológico, destrucción del hábitat, disminución en la abundancia y pérdidas en la biodiversidad (Wilkinson *et al.*, 2009).

La zona costera

Dentro de la clasificación de las zonas costeras podemos encontrar ambientes pelágicos, intermareales y ambientes bentónicos característicos de las formaciones arrecifales (Witman y Kaustuv, 2009). Margalef (1974) menciona que las condiciones de las comunidades transitorias (particularmente las costeras), explotadas o bajo condiciones ambientales muy fluctuantes, son de diversidad baja; por el contrario, los ecosistemas de ambientes estables tienden a aumentar su biodiversidad. En la zona costera se encuentran ecosistemas que se caracterizan por una alta producción biológica (biomasa) más que por una alta diversidad de especies, siendo importantes para otros ecosistemas marinos como los arrecifes coralinos (Whittaker *et al.*, 2001).

Los arrecifes de coral están constituidos por colonias de organismos bentónicos marinos del Filo Cnidaria, particularmente del orden Scleractinia constituido principalmente por corales hermatípicos, los cuales tienen un endoesqueleto de carbonato de calcio y la acumulación de las colonias de coral contribuyen en la formación de arrecifes (Brusca y Brusca, 2005). Los corales se desarrollan de manera óptima en aguas pobres en nutrientes y tienen asociaciones con dinoflagelados fotosintéticos (Jordán *et al.*, 1978; Lara-Domínguez, 2005). Su distribución a nivel mundial es en aguas tropicales poco profundas en donde tienen tasas de crecimiento altas (Brusca y Brusca, 2005).

Los arrecifes de coral proporcionan bienes y servicios ecosistémicos para millones de personas sobre todo en los trópicos, ya que sustentan a una comunidad rica y abundante de formas de vida y proporcionan nichos a otros organismos (Lara-Domínguez, 2005; Pinnet, 2009; Trujillo y Trurman, 2011). No solo son ecosistemas importantes desde el

punto de vista ecológico, también tienen importancia para la sociedad ya que proveen protección a la línea costera, sirven como hábitat de crianza de peces e invertebrados, son importantes para industria farmacéutica y representan una fuente de empleo a través de la pesca y el turismo (Segrado *et al.*, 2010; AIDA, 2014).

Algunas de las condiciones que afectan a los sistemas arrecifales son las partículas en suspensión, ya que, al ser animales bentónicos, las partículas pueden ser depositadas sobre los corales y enterrarlos (Pinnet, 2009; Witman y Kaustuv, 2009). El incremento de la temperatura del agua marina puede tener un efecto negativo sobre las comunidades arrecifales, ya que el aumento de la temperatura en la columna de agua es causante de la pérdida de zooxantelas (dinoflagelados fotosintéticos), resultando en el blanqueamiento de coral (AIDA, 2014). En la actualidad y a nivel mundial los arrecifes están sufriendo un decremento en su cobertura, siendo los impactos humanos directos o indirectos una de las principales causas, (agricultura, deforestación, sobrepesca, turismo, industria, efluentes continentales y aguas subterráneas) (Pérez, 1999; Pinnet, 2009).

El aumento de nutrientes en el agua, particularmente en las zonas cercanas a la costa puede afectar negativamente los arrecifes. Ya que el aumento de nutrientes está estrechamente relacionado con pastos marinos, los cuales compiten por espacio con los corales y albergan comunidades de otros *phyla*. Los pastos marinos colonizan manchones de arena, aprovechan las áreas donde hay nutrientes y compiten con otros grupos bentónicos por el recurso bentónico (Zieman, 1982). Los pastos marinos son angiospermas que se encuentran por debajo del agua y se distribuyen por manchones. El papel ecológico de los pastos marinos es fundamental ya que proporcionan un hábitat importante a una gran variedad de organismos (ej: invertebrados y peces), dando cierta complejidad estructural (Gallegos, 1994; Lara-Domínguez, 2005; Canizales 2017; McField, 2020).

Comunidades biológicas

Las comunidades biológicas, particularmente las marinas, son complejas, existe variación en todos los niveles de organización. Las comunidades interactúan de cualquier número de formas (consumo, competencia, mutualismo, facilitación y modificación) (Verhoef, 2010). La definición *per se* de comunidades ha sufrido cambios desde el siglo pasado, Odum (1972) determinó que las comunidades pueden nombrarse y clasificarse adecuadamente según 1) sus características estructurales más importantes, como las especies dominantes,

las formas o los indicadores de vida, 2) el hábitat físico de la comunidad, o 3) sus atributos funcionales, tales como el tipo de metabolismo de la comunidad.

Casi toda comunidad natural se caracteriza por tener una alta diversidad y un bajo número de individuos por especie; por el contrario, una comunidad alterada o bajo presión de contaminación se caracteriza por poseer un bajo número de especies y mucha abundancia (Pérez, 1999). La diversidad permite describir los componentes del sistema bajo estudio, hacer comparaciones entre sistemas y representa información relevante para generar teorías. La diversidad puede medirse en diferentes formas y variar a diferentes escalas (alfa, beta, gama, etc.) (Guerra, 2012).

Para comprender de manera integral a una comunidad adicionalmente de registrar la diversidad, como riqueza de especies, se deben considerar las distancias y la diversidad taxonómica, ya que la riqueza de especies no refleja la diversidad filogenética. Los atributos del taxón como la complejidad entre sus relaciones sistemáticas nos ayudan a comprender la sensibilidad de un ambiente ante los cambios sin importar su grupo taxonómico, además de que no es sensible al esfuerzo del muestreo y refleja el posible impacto entre áreas (Warwick y Clarke, 2001; Brown *et al.*, 2002; Aurelio Da Silva y Batalha, 2006).

¿Por qué utilizar fauna como indicadores del estado de condición de un arrecife? Algunos grupos de peces y algunos invertebrados (moluscos por su gran diversidad) pueden ser importantes para la comunidad desde una perspectiva trófica (Odum, 1972). La presente investigación se centra sobre todo en el análisis de los peces y los moluscos, principalmente por tres razones: 1) la plasticidad taxonómica y fenotípica y su sensibilidad a índices de diversidad (Pérez, 1999); 2) la asociación que tienen a ambientes como arrecifes de coral y pastos marinos y 3) la falta de estudios puntuales que aborden estos dos elementos claves en las comunidades en la zona del Caribe mexicano.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

Calidad del agua en los sistemas arrecifales

Aranda (2004), analizó la calidad del agua en zona costera de Yucatán con el índice de estado trófico TRIX de calidad de agua, encontrando que no hay diferencias en las épocas de lluvias y sequías, la variación está ligada a factores como densidad poblacional, agua vertida al acuífero y determinan que la calidad del agua va desde oligotrófica hasta mesotrófica. Carruthers y colaboradores (2005), evaluaron la influencia de las descargas de agua subterránea marina y aguas residuales en la dinámica de los nutrientes de las praderas de pastos marinos del Caribe. La investigación reporta que el aumento de precipitación coincide con el aumento de contenido de fósforo de las praderas de *Thalassia testudinum*. Herrera-Silveira y colaboradores (2015) midieron las características de la columna de agua en el norte de Quintana Roo y registraron la temperatura, salinidad, coeficiente de extinción de luz, nutrientes y oxígeno disuelto; concluyendo que la calidad del agua es de regular a mala para los polígonos de Punta Cancún y Punta Nizuc, y regular a buena para Isla Mujeres, por lo que el norte de Quintana Roo se considera como vulnerable.

Szmant (2002) a través de un modelo conceptual para la productividad, indica que en agua con baja concentración de nutrientes y herbívora constante, los corales y pastos marinos son dominantes, sin embargo, con el aumento de nutrientes la dominancia de se desplaza hacia las macroalgas carnosas. Segrado y colaboradores (2010), indicaron que las actividades antropocéntricas son las responsables del deterioro de comunidades costeras, entre las que destacan el turismo, el aumento de la población, las descargas del acuífero al mar, provocando un aumento de nutrientes y por lo tanto el aumento de poblaciones de pastos marinos, que a su vez compiten con las colonias coralinas y atraen depredadores de primer nivel. Hernández-Terrones y colaboradores (2011), reportaron que el aporte de fósforo puede modificar el estado trófico de la costa y afectar a las comunidades coralinas. Mata-Lara (2016), evaluó las estrategias de manejo de la bahía de Akumal, reportado a la zona arrecifal en condición crítica por las condiciones de la fauna y reporta la calidad del agua como fluctuante comparándola con sitios cercanos, puntualiza que factores como la densidad de población y la ausencia de las plantas de tratamiento tienen una influencia directa a la condición del arrecife.

Cambio de cobertura arrecifal

Suarez y colaboradores (2005), reportan que la cobertura de algas es mayor a la cobertura de corales en el norte de Quintana Roo y que los corales del norte del Caribe mexicano se encuentran en riesgo. La CONANP (2016), indica que la transformación de los hábitats costeros en Quintana Roo, se debe a la alta concentración de embarcaciones y de turistas en zonas arrecifales someras, la extracción de especies, el encallamiento de embarcaciones, la ocurrencia de derrames y el mal manejo de aceites y gasolina de embarcaciones. Arias-González y colaboradores (2017), modelan el cambio de fase de cobertura coralina a algal por cambios en la abundancia de peces herbívoros con datos generados durante de 14 años. McField y colaboradores (2020), reportan que en el Caribe mexicano el porcentaje de algas es mayor al de corales, mientras que los corales (en su mayoría especies oportunistas) tuvieron el 16% de cobertura bentónica, las algas carnosas tuvieron el 16% y finalmente los tapetes de algas el 28% lo que interviene con el reclutamiento de corales.

Estado de condición arrecifal

Barajas (2009), comparó la estructura comunitaria en arrecifes del Golfo de México y Mar Caribe. Evaluó la riqueza, abundancia, diversidad, equitatividad y distinción taxonómica en las comunidades de peces, equinodermos y corales. En ambos sitios se encontraron puntos críticos (baja diversidad), sin embargo, reporta que la diversidad es un buen indicador de la calidad de los ecosistemas. Bernal (2018), estimó la diversidad y complejidad estructural de dos arrecifes de coral, analizando las comunidades de moluscos, decápodos y equinodermos de Puerto Morelos, caracterizándose con una complejidad baja. Carrillo-García (2018), propone un marco de indicadores para el monitoreo de los arrecifes del Caribe mexicano, destacando la diversidad de peces y corales para la composición de ecosistema, el análisis de macroalgas filamentosas, porcentaje de blanqueamiento de coral, determinando como un indicador de prioridad media a las comunidades de invertebrados.

Fauna

Se han realizado diversos estudios sobre la comunidad de peces a lo largo de las costas del Caribe mexicano, los trabajos más representativos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Estudios de peces realizados en el Caribe mexicano.

Autor y año	Zona de estudio y resultado más importante
Burgos-Legorreta, 1992.	Elaboran una lista de peces de Puerto Morelos, Quintana Roo. Reportando 124 especies de peces, siendo las familias Haemulidae y Labrisomidae las más abundantes.
Núñez-Lara y Arias-González, 1998	Analizan la estructura de la comunidad de peces de tres arrecifes en el sur de Quintana Roo. Reportan 134 especies de peces en 60 sitios de muestreo, reportan diversidades bajas y determinan que las variables ambientales influyen directamente en la composición de la fauna.
Guevara-Muños, 1998	Analizaron la estructura de la comunidad de peces en Chankanaab, Cozumel. Identifican 129 especies de peces y determinando que las zonas con mayor similitud son los parches de arena y pastos.
Schmitter-Soto <i>et al.</i> , 2000	Elaboraron una lista de peces para el Caribe mexicano, reportando 577 especies y ocho nuevos registros para la zona.
Basurto-Lozano, 2001	Analizaron la estructura de los peces de la familia Pomacentridae del arrecife Ixlache, Quintana Roo. Reportan 71 especies siendo las más abundantes los herbívoros, particularmente de la familia Scaridae.
Chávez-Hidalgo, 2009	Estudiaron la conectividad entre arrecifes del Golfo de México y Caribe mexicano, reportando 167 especies de peces con una diversidad alta de 4.8 bits/ind y determinan una variación geográfica a mayores distancias entre los puntos.
Garza-Pérez <i>et al.</i> , 2010	Evaluaron el estado de condición de la zona arrecifal de Akumal, Quintana Roo. Reportan 81 especies de peces y 41 especies de coral en 38 transectos. La diversidad de peces fue alta con 3.14 bits/ind concluyendo que el estado en Akumal es crítico debido a su baja riqueza de especies, poca cobertura coralina, dominancia de algas y especies oportunistas.
Domínguez-Domínguez <i>et al.</i> , 2015	Presentaron un informe del estado de la Ictiofauna en los humedales de Puerto Morelos, Quintana Roo. Reportan 231 especies de peces en 46 sitios, siendo Haemulidae, Gobiidae y Serranidae las familias más abundantes.

Continuación

Molina-Hernández, 2016	Analizaron la estructura de peces y su relación con el hábitat en Akumal, Quintana Roo. Reportan 126 especies de peces y 41 de corales en 41 sitios de muestreo. Concluyendo que las variables ambientales y la profundidad afectan a la comunidad.
------------------------	---

Si bien los trabajos de peces son considerables, desde trabajos de contenido estomacal hasta estudios de importancia en la medicina, en este trabajo se tomaron en cuenta nueve trabajos que antes se mencionaron, ya que en ellos reportan la distribución, la abundancia y la riqueza en el Caribe mexicano. Se consideró tomar solo los de los últimos 30 años, ya que, Vázquez-Yeomans y González-Vera, 1992 realizaron una lista de la ictiofauna del Caribe mexicana registrando 311 especies y Schmitter-Soto *et al.*, 2000 actualiza dicha lista. También se consideró principalmente la riqueza de especies, ya que en la mayoría de los trabajos no evalúan la diversidad.

En el caso de moluscos, es menor la cantidad de estudios realizados para el Caribe mexicano. Pérez-Rodríguez (1980) analizó la importancia biológica de moluscos, así como características del filo, reportando 78 especies de moluscos para el Caribe mexicano, obtenidos por medio de colectas a varias profundidades y reportando que los gasterópodos y bivalvos son las comunidades más ricas en especies y abundantes. Ardisson y colaboradores (2012), reportaron 36 especies de moluscos gasterópodos para el Sistema Arrecifal Mesoamericano parte mexicana (Quintana Roo). Castillo-Rodríguez (2014), reportó que en el Golfo de México y Caribe mexicano existe la identificación de 2067 especies de moluscos. Sánchez-Villalobos (2014) elaboró una base de datos de los registros de moluscos en bases de datos de la Secretaría de Marina, reportó 273 especies de moluscos en el Golfo de México y Caribe mexicano. Hernández y Álvarez (2019), identifican 120 especies de moluscos en Puerto Morelos.

Graham *et al.*, (2017) estudiaron la variación de la abundancia y riqueza a diferentes escalas a través de un modelo lineal, reportan que las variables como nutrientes, temperatura, distancia a la costa, posición geográfica y área, encontrando que la presencia de peces y los nutrientes (principalmente los nitratos), influyen en la riqueza de los invertebrados. Reportan también que la temperatura influye en la riqueza de peces. A escala de ecoregión (entendida por grandes extensiones de territorio con características similares), indican que a altas temperaturas y alta concentración de nitratos existe una mayor abundancia de peces que de invertebrados, ya que los nitratos tienen un efecto

directo en la producción primaria, por ser la especie de nitrógeno que puede ser asimilada por organismos fotosintéticos. Si los nitratos tienen baja concentración y la temperatura es alta hay una mayor riqueza de especies de peces que de invertebrados. Finalmente, a una temperatura alta, la concentración de nitrato, la ubicación respecto a la costa y los gradientes longitudinales en la región del Caribe mexicano existe la misma abundancia de peces y moluscos, una riqueza mayor de peces que de moluscos a nivel de sitio y una riqueza de especies similar entre peces y moluscos a nivel local.

Justificación

A escala mundial, la pérdida de coberturas de arrecifes coralinos aumenta a niveles nunca vistos, por lo que es importante conocer la biodiversidad existente, así como determinar el estado de condición con diferentes grupos de organismos tanto no sésiles como sésiles que genere información integral y aportar conocimiento para la conservación de estos ecosistemas clave.

Hipótesis

La diversidad de los peces y moluscos en la zona centro y norte del Caribe mexicano es diferente, estas diferencias están relacionadas con la calidad del agua, la cobertura coralina, especies formadoras de arrecife y cobertura algal, así como las condiciones locales existentes como el número de habitantes y descargas ilegales al acuífero.

Objetivo general

Caracterizar la fauna de peces y moluscos asociada a los arrecifes de coral en sitios de la zona centro y norte del Caribe mexicano.

Objetivos particulares

- Medir el índice de estado trófico TRIX con los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua en los sitios de estudio de la zona centro y norte de las costas del Caribe mexicano.
- Caracterizar la cobertura bentónica con énfasis en algas y corales para los sitios de la zona centro y norte de Caribe mexicano.
- Identificar taxonómicamente la fauna arrecifal (peces y moluscos) registrados en los sitios de la zona centro y norte del Caribe mexicano.

- Caracterizar las propiedades ecológicas como abundancia, riqueza, diversidad y especies clave, de la comunidad de peces y moluscos.
- Determinar el estado de la condición de la zona centro y norte de las costas del Caribe mexicano, con base en la información de fauna, flora y condiciones del agua

CAPÍTULO 2

Área de estudio

La región mexicana del Atlántico, lo constituye el Golfo de México y el Mar Caribe, las cuales se subdividen en tres ecorregiones marinas; el Golfo de México dividida en Golfo Norte marcado con la zona 13, y lo caracteriza la desembocadura del Río Misisipi ya que su aporte le brinda características particulares. El Golfo de México Sur, zona 14 va desde los estados de Veracruz hasta Yucatán, de igual manera que el Golfo Norte, el Golfo Sur presenta características que lo distinguen desde lagunas costeras, estuarios y dunas hasta zonas de manglar, lechos de pastos marinos y algunos arrecifes coralinos. En el Golfo se encuentran dos zonas arrecifales importantes, el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y el Sistema Arrecifal de Tuxpan. El Caribe mexicano o ecorregión 15, está ubicada en la península de Yucatán en los límites con el estado de Quintana Roo (Figura 1), ahí se ubica una porción del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM). Estos arrecifes coralinos están sometidos a altos niveles de deterioro y muchas especies se encuentran bajo algún estado de conservación o en peligro de extinción, habiendo sufrido algunas un declive de más del 90 por ciento de su cobertura (Figura 2) (Tunnell Jr. *et al.*, 2007 y Wilkinson *et al.*, 2009).

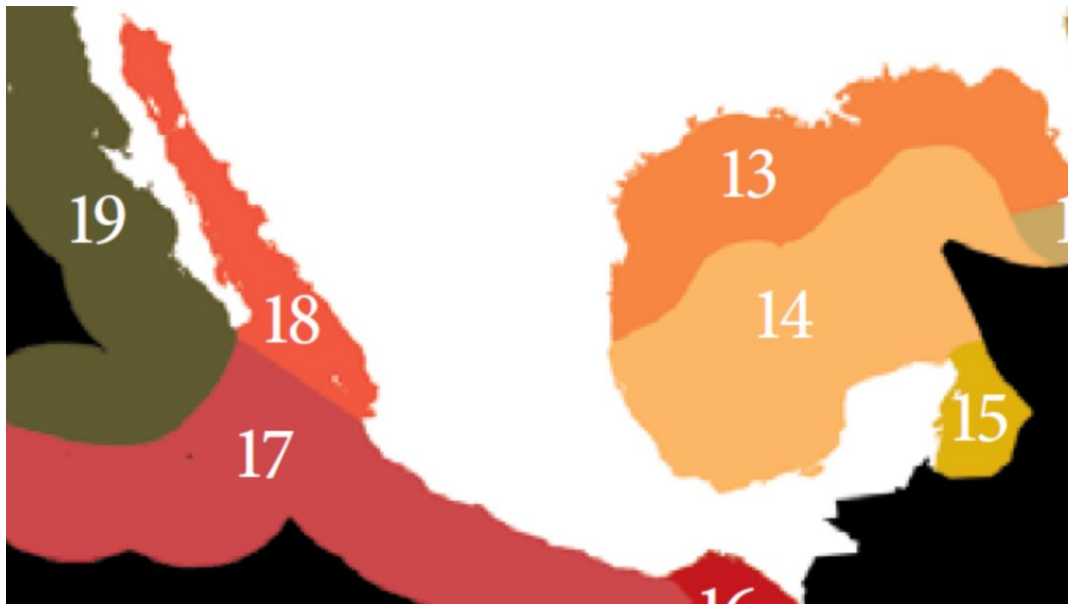


Figura 1. Ecorregiones marinas en la zona del Atlántico mexicano (tomado de Wilkinson *et al.*, 2009).

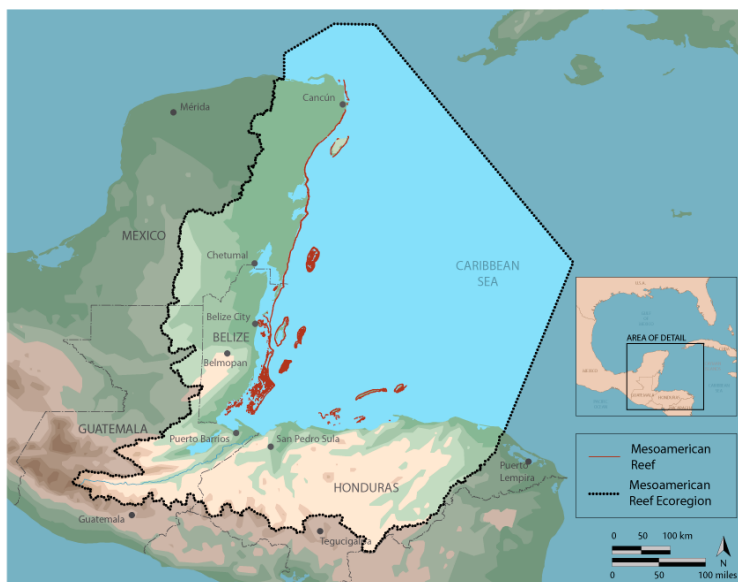


Figura 2. Sistema Arrecifal Mesoamericano (SEMARNAT, 2006).

Región del Caribe mexicano

El Caribe mexicano es básicamente una región pobre en nutrientes y con sedimentos mixtos, está ubicado en el occidente de la península de Yucatán, comprendiendo una amplia plataforma carbonatada que se extiende hasta 100 millas desde el margen costero y con profundidades menores a 50 m (Álvarez *et al.*, 2011). Desde las inmediaciones de la ciudad Cancún, corre el llamado Gran Cinturón de Arrecifes del Caribe, que se extiende hacia el sur de manera intermitente, hasta el arrecife Xcalak, con aproximadamente 350 km de extensión (Chávez-Hidalgo, 2009). El área de estudio en el presente trabajo se ubica en el centro y norte Quintana Roo (Caribe mexicano), desde Tulum hasta el Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún punta Nizuc (Figura 3). Los arrecifes que se encuentran en el Caribe mexicano son arrecifes marginales y están cercanos a la línea de costa, no son continuos, tienen interrupciones que se pueden diferenciar por municipios o por zonas. De Punta Nizuc a Puerto Morelos, la estructura arrecifal alcanza la superficie y es claramente visible a no más de un kilómetro de la costa. De Puerto Morelos a Playa del Carmen hay una interrupción de 18 kilómetros, continúan los arrecifes por cerca de 35 Km hasta Tulum donde hay otra interrupción hasta Sian Ka'an. Playa del Carmen y Akumal tienen características similares, ya que tienen interrupciones en la barrera de arrecifes, presentan tramos con numerosos cabezos aislados, los arrecifes se encuentran desde la costa a menos de un 1 km mar adentro y tienen arrecifes bien desarrollados entre 15 y 45 metros de profundidad. Desde Tulum hasta el parque Nacional Arrecifes de Xcalak la

barrera es casi continua y los arrecifes se encuentran entre 1.5 y 2.5 km de la costa en donde se presenta el área más grande con diferentes estatus de protección (Ardisson *et al.*, 2012).

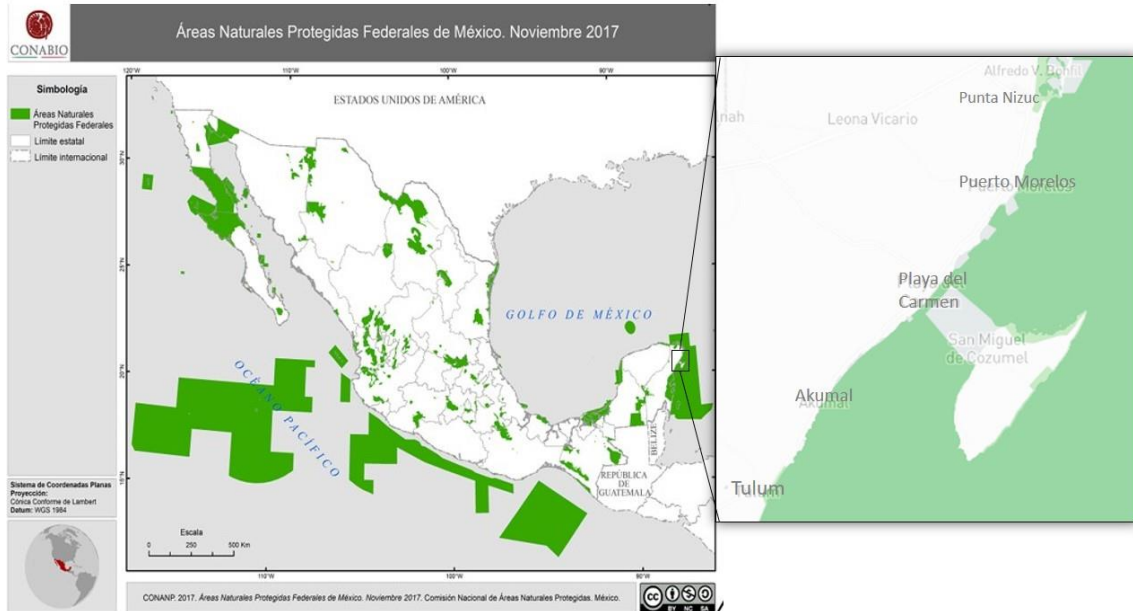


Figura 3. Áreas Naturales Protegidas en México, resaltando el centro y norte del estado Quintana Roo (Generado en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

Clima

El clima es de tipo cálido-subhúmedo con régimen de lluvias en verano y escasas el resto del año $Ax' (w_0) iw''$. La temperatura media del agua oscila alrededor de 27.7 °C y las temperaturas medias extremas en 19 °C (mínima) y 35.2 °C (máxima). La variación del rango de temperatura entre el mes más frío y cálido es de 5 °C y la variación por día es de 3°C, por lo tanto, se considera isotermal con lluvias en verano. La época de lluvias comprende mayo a octubre, ocasionalmente se presentan tormentas tropicales y ciclones entre junio y noviembre, debido a que Quintana Roo se encuentra en las zonas ciclónicas del Caribe (Antillas), estiaje es de diciembre a abril (INEGI, 2002; Cherrington 2011; Coral y Campos, 2013).

Hidrogeología

El acuífero es de tipo costero, se encuentra en rocas calizas y depósitos de litoral con alta permeabilidad. El acuífero es cárstico de tipo libre y se considera como una cuenca hidrológica abierta en donde los niveles del manto freático varían algunos centímetros entre las épocas de lluvias y secas y presenta niveles estáticos de casi 5 m en una franja de 15 km de ancho paralela a la costa (Coral y Campos, 2013). La península de Yucatán (PY) tiene un acuífero muy vulnerable a la contaminación de todo tipo y esta contaminación tiene como destino final las costas (Herrera-Silveira *et al.*, 2015).

Materiales y Métodos

La investigación constó de cuatro procesos, el primero fue la revisión bibliográfica que consistió en la recopilación de literatura especializada, tanto de peces y moluscos, así como el de las herramientas que sustenten el análisis ecológico. El segundo fue el trabajo en campo que se realizó con prestadores de servicios de buceo y con ayuda del personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas del Parque Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. El tercer proceso fue el análisis de las muestras de agua en laboratorio para clorofila a, nitritos, nitratos, amonio y fosfatos y la identificación de la fauna en laboratorio. Finalmente, el trabajo de gabinete que constó de la redacción, la clasificación y el análisis de los datos.

El muestreo se realizó en 19 sitios de la zona centro y zona norte del Caribe mexicano. La zona centro corresponde a las localidades de Tulum y Akumal, estas localidades tienen una población menor que las del norte; las localidades del norte corresponden a Playa del Carmen y Punta Nizuc, con una densidad poblacional mayor y centros turísticos bien desarrollados y que siguen en aumento.

Diseño de muestreo

El muestreo se llevó a cabo por medio de buceo autónomo SCUBA, iniciando con siete sitios en Tulum del 23 al 26 de septiembre de 2019, seguido de seis sitios en Akumal, Bahía Príncipe del 12 al 14 de noviembre y tres en Playa del Carmen el 20 y 21 de noviembre de 2019 y finalmente tres sitios en Punta Nizuc el 20 de febrero del 2020 (Figura 4).

1) Revisión bibliográfica.

La revisión bibliográfica consistió en recabar información de las especies que han sido registradas en el área de estudio, así como la metodología empleada. El objetivo es tener

una aproximación de lo que se podría encontrar durante los muestreos y corroborar que las especies registradas estuvieran dentro de la zona de distribución. Para obtener la información de las especies de fauna se revisaron artículos publicados, inventarios faunísticos, bases de datos y tesis (Red List, Itis, Naturalista, Smithsonian Institution, Fishbase, Worms, Malacolog 4.1.1, Algaebase), con la cual, se obtuvo una aproximación de lo que se podría encontrar y para corroborar que las especies registradas estuvieran dentro de la zona de distribución.

2) Trabajo en campo

En cada sitio del muestreo se tomaron las coordenadas geográficas por medio de un GPS marca GARMÍN con una presión de 5 metros (Anexo 1), profundidad (m), hora (hora: min) y se registraron las especies de peces y moluscos, así como se realizaron video-transectos para medir cobertura de los grupos bentónicos según Garza-Pérez *et al.*, 2010. La literatura que se consultó para la identificación de peces fue De la Cruz, 2016; Gallardo, 2014 y Humann, 2002. Para los moluscos las guías de consulta fueron Tunnell Jr. *et al.*, 2010, García-Cubas, 2004 y Abbot, 1974. También se tomaron muestras de agua lo más cercano posible al bentos para el análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos.

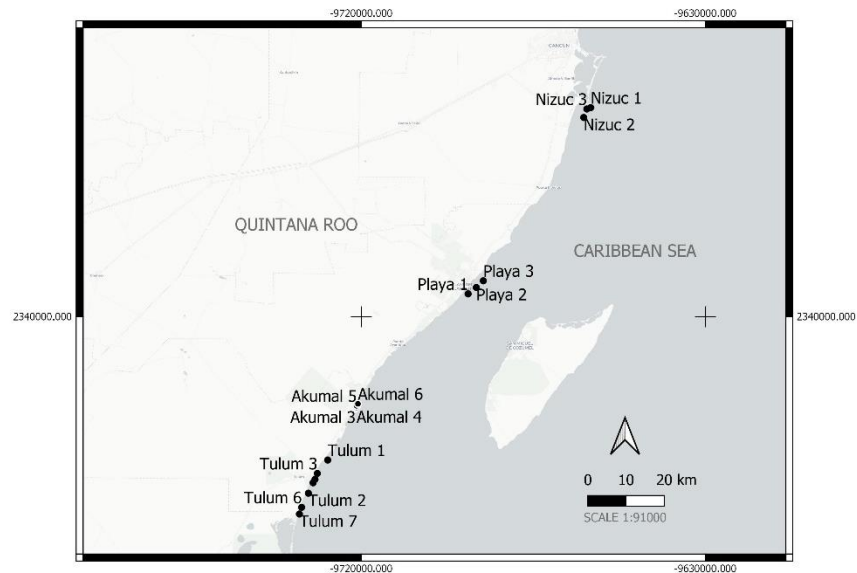


Figura 4. Sitios de muestreo de los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Toma de muestras para análisis fisicoquímicos.

A cada sitio de muestreo se midió *in situ* por medio de una sonda multiparamétrica HIDROLAB DATASONDE, el pH, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (en algunos sitios se tomaron muestras para su posterior análisis en laboratorio). En cada sitio se tomaron muestras de un litro de agua en botellas de polietileno ámbar, para medir nutrientes: Nitritos, Nitratos, Amonio, Fosfatos y Clorofila *a* en laboratorio, la toma de las muestras fue lo más cercano al bentos que los sitios lo permitan. Una de las funciones de los parámetros fisicoquímicos es medir el índice de TRIX de calidad de agua, el cual sirve para indicar el estado de eutrofización de un cuerpo de agua. Se decidió medir este índice ya que Herrera (2014) hace un monitoreo en el norte de Quintana Roo, del 2008 al 2014, por lo que servirá para comparar la condición del cuerpo de agua y apoya el análisis de la diversidad de la comunidad.

Videotransectos y registro de las especies

Según el proyecto para el Sistema Arrecifal Mesoamericano elaborado por Almada *et al.*, (2003) el Caribe mexicano entra en la categoría 1 por su cercanía con la plataforma continental; sugiere que es suficiente un muestreo por año en cada sitio por lo que se ajusta al presente trabajo. En esta categoría es importante medir parámetros específicos para caracterizar la fauna, tal es el caso del porcentaje de cobertura de algas, porcentaje de cobertura de coral, abundancia y riqueza de especies de peces y moluscos.

Registro del bentos

Para los grupos bentónicos se utilizó la técnica de video-transecto para corales y para macroalgas, además se identificaron grupos funcionales de macroalgas según Short *et al.* 2006 en 12 cuadrantes 50 x 50 cm por cada transecto. Para la toma de videotransectos, así como el muestreo en general se utilizó buceo autónomo SCUBA y se seleccionaron puntos de muestreo poco profundos (1-5 m) y profundos (>8 m) de manera dirigida. Se realizaron transectos paralelos a la línea de costa, de una longitud de 30 m y un campo de visión de 1 m con cuatro repeticiones, la información se obtuvo con una cámara CANON. Se analizaron y obtuvo el porcentaje de cobertura de pastos marinos y corales (Figura 5) (Almada *et al.*, 2003; Acosta 2013).

Registro de peces

Para la obtención de información de peces, se realizó un censo visual en un transecto de 30 metros de largo y dos metros de ancho, con cuatro repeticiones. Se registró la información de las especies de peces adultos, coordenadas y con la información que obtuvo en las bases de datos previamente se confirmará su registro. La clasificación que se utilizó fue la de Nelson, 2016.

Registro de moluscos

Para el caso de moluscos realizaron transectos de 30 m de longitud por 1 m de campo de visión con cuatro repeticiones y se identificó *in situ* por el método de muestreo directo, sin embargo, las especies que se dificultó su identificación, se recolectaron para precisar la especie en laboratorio; para lo cual se cuenta con un permiso de colecta y se contaron conchas vacías y organismos vivos. La clasificación utilizada para moluscos fue la de Bouchet y Rocroi 2010.

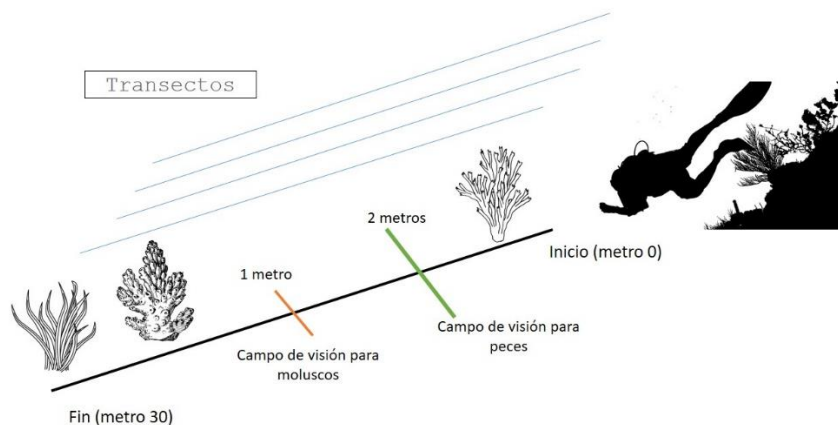


Figura 5. Diagrama de censos visuales para peces y muestreo de moluscos.

3) Trabajo de Laboratorio

La primera parte del trabajo de laboratorio correspondió a análisis fisicoquímicos del agua. La siguiente fue el análisis de videotransectos y la documentación de especies.

Las muestras de agua fueron filtradas con un filtro de membrana 0.45 μm y se midieron los nutrientes disueltos y con un filtro de fibra de vidrio de 0.7 μm para la clorofila *a*, por espectrofotometría UV-VIS en un espectrofotómetro de la marca BioSpectrometer Eppendorf (Tabla 2).

Tabla 2. Nutrientes disueltos y método para medirlo en espectrofotometría.

Nutriente	Método	Referencias
Nitritos (mg N-NO₂⁻/L)	Reacción con sulfanilamida	U.S. Environmental Protection Agency, 1979; NMX-AA-099-SCFI-2006
Nitratos (mg N-NO₃⁻/L)	Reacción con brucina	Jenkins, D., and Medsken, L. 1964 y U.S. Environmental Protection Agency 1971 y 1975,
Amonio (mg N-NH₄⁺/L)	Fenato	Solorzano, 1969 y Parsons <i>et al.</i> , 1984
Fosfatos (mg PO₄⁻³/L)	Ácido ascórbico	Henriksen, 1996 y U.S. Environmental Protection Agency, 1979
Clorofila a (mg/m³)	Monocromático con acidificación	Lorenzen, 1967 y Aminot y Rey, 2000
Oxígeno disuelto	Yodométrico	U.S. Environmental Protection Agency, 1979

4) Trabajo de gabinete.

Por último, en el trabajo de gabinete se analizaron los datos obtenidos en los muestreos y se midieron los siguientes parámetros: abundancia (N), riqueza específica (S), índices de rarefacción, diversidad de Shannon-Wiener (H'), equitatividad de Pielou (J'), prueba *t* de Hutchenson (*t*), test de Olmsted y Tukey, SIMPER (similarity percentage), similitud de Bray Curtis (B), índices taxonómicos (Δ), análisis de componentes principales CANOCO, PERMADISP y PERMANOVA (Odum, 1972; Margalef, 1974; Moreno 2001; Ardeson *et al.*, 2008 y Rocha *et al.*, 2012).

Índice de calidad de agua

El índice de calidad del agua TRIX mide el estado trófico del agua. Su valor máximo es 10 y con base en este valor se asignan la constante explicar que es cada uno (Vascetta *et al.*, 2008).

$$TRIX = \frac{[\log_{10}(\text{Ch } a) + \log_{10}(\%O_d) + \log_{10}(\text{DIN}) + \log_{10}(\text{PRS}) - k]}{m}$$

Donde:

K=1.5, m=1.2

Nitrógeno inorgánico disuelto (DIN)= (mg N-NO₃⁻/L) + (mg N-NO₂⁻/L) + (mg N-NH₄⁺/L)

Fósforo reactivo soluble (PRS)= fosfatos (mg PO₄⁻³/L)

Oxígeno disuelto=% O_d

Análisis ecológicos

Fauna

La Abundancia (N) es el Número de organismos por especie, mientras que la riqueza específica (S) es el Número de especies. El Índice de rarefacción mide la acumulación de especies estimadas con base en las observadas. La prueba Jackknife 1 es una estimación no paramétrica de riqueza de especies para sitios aleatorios. Se basa en la frecuencia de especies únicas en la comunidad, es una técnica para reducir el sesgo de los valores estimados.

$$Jack\ 1 = s + L \left(\frac{m-1}{m} \right)$$

Donde:

s= número total de especies observadas en n sitios

m= número total de sitios muestreados

L= número de especies únicas

Jacknife 2: Se basa en el número de especies que ocurren solamente en una muestra, así como en el número de especies que ocurren en exactamente dos muestras.

$$Jack\ 2 = s + \frac{L(2m-3)}{m} - \frac{M(m-2)^2}{m(m-1)}$$

Donde:

s= número total de especies observadas en n sitios

m= número total de sitios muestreados

L= número de especies únicas

M= Número de muestras donde ocurren exactamente dos especies

Bootstrap: Estima la riqueza por presencia y ausencia en un n número de sitios y requiere de una herramienta computacional.

$$B(S) = S + \sum (1 - P_i)^n$$

Donde:

B(S)= Estimación de Bootstrap del número de especies

S= Número de especies observadas

Pi= Proporción de n sitios que tienen especies presentes

Chao: Es un estimador de riqueza con poco sesgo en comunidades pequeñas basados en especies únicas y raras.

$$Chao = S + \frac{L^2}{2M}$$

Donde:

L= número de especies que ocurren solamente en una muestra (especies "únicas").

M= número de especies que ocurren en exactamente dos muestras.

Diversidad alfa: Diversidad dentro de las comunidades de manera local o por zona y en función de la riqueza de especies.

Diversidad de Shannon-Wiener (H'): refleja la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de la riqueza específica y la abundancia relativa, y es una medida de la incertidumbre para predecir a qué un individuo elegido al azar pertenece a una especie de una muestra de S especies y N individuos.

$$H' = - \sum_{i=1}^n P_i * \log P_i$$

Donde:

S= Riqueza de especies

Pi= Proporción de la especie i en la muestra=ni/N

N= Número de individuos en la muestra

Prueba t (Hutchenson): Compara la diversidad de Shannon-Wiener, y se obtienen diferencias significativas entre muestras.

$$t = \frac{(H'1 - H'2)}{(\text{var}H'1 + \text{var}H'2)\left(\frac{1}{2}\right)}$$

$$\text{var}H' = \frac{(\sum pi(Lnpi)^2 - (\sum pi Lnpi))}{N + (S - 1)/2N}$$

$$g.l = \frac{(\text{var}H'1 + \text{var}H'2)}{\frac{((\text{var}H'1)^2)}{N1} + \frac{((\text{var}H'2)^2)}{N2}}$$

Donde:

H'1= Diversidad de la muestra uno

H'2= Diversidad de la muestra dos

varH'= Varianza de la diversidad acumulada

S= Riqueza de especies

N= número de individuos

Equitatividad de Pielou J' (Uniformidad): Medida relativa de la homogeneidad de la comunidad, en donde el valor máximo refleja que todas las especies están igualmente representadas en la muestra, representadas por su abundancia.

$$J' = \frac{H'}{H_{max}}$$

Donde:

H'= Diversidad de Shannon-Wiener.

Hmáx= Valor máximo de diversidad con la función Shannon-Wiener.

Test de Olmsted y Tukey: Relación entre la frecuencia y abundancia de cada especie presentada en una gráfica de dispersión, el cual determina las especies dominantes, raras, comunes y frecuentes.

SIMPER (similarity percentage): es un procedimiento que permite descomponer la contribución de cada especie, al promedio de similitud entre todos los pares de muestras, y permite identificar cuáles especies contribuyen más a la similitud dentro de un tratamiento. El procedimiento se realiza luego entre tratamientos basados en la abundancia e identifica las variables que contribuyen más a la disimilitud en el programa PRIMER-e V7 (Clarke y Warwick, 2001).

Diversidad beta: La tasa de recambio o diferenciación entre las comunidades.

Bray-Curtis: Los coeficientes de distancia son medidas de disimilitud y similitud, cuando la medida es cero, las comunidades son idénticas. Ignora los casos en los que las especies están ausentes en ambas muestras, las especies raras contribuyen poco.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^S X_{ij} - X_{ik}}{\sum_{i=1}^S X_{ij} + X_{ik}}$$

Donde:

X_{ij}= Número de individuos de la especie i en la muestra j

X_{ik}= Número de individuos de la especie i en la muestra k

S= Número de especies

Índices taxonómicos

Para realizar un análisis de diversidad taxonómica fue necesario tener una lista madre con la sistemática dividida en: Clase, Orden, Familia, Género y Especie. La asignación de valores para determinar la distancia se obtuvo según lo mencionado por Warwick (2002), en donde la ponderación más simple posible de las longitudes de paso entre niveles en la jerarquía taxonómica para calcular estas medidas de distinción, es decir incrementos iguales de longitud entre cada nivel sucesivo: p.ej. ω = 1 (especies del mismo género), 2 (misma familia pero diferentes géneros), 3 (mismo orden pero diferentes familias), 4 (misma clase pero diferentes órdenes), 5 (mismo filo pero diferentes clases), 6 (diferente phyla).

La diversidad taxonómica es el conjunto de índices taxonómicos y se midieron en el programa PRIMER 7 + PERMANOVA: la diversidad taxonómica, distintividad taxonómica, diversidad taxonómica promedio y la variación de la distintividad taxonómica.

Diversidad taxonómica: Considera la riqueza y la abundancia, además toma en cuenta el arreglo y distancia taxonómica promedio presentes en las especies

$$\Delta = \frac{\sum \sum_{i < j} W_{ij} X_i X_j}{N(N - 1)/2}$$

Distintividad taxonómica: Es la distancia taxonómica promedio esperada entre cualquier par de individuos seleccionados al azar en una muestra, siempre y cuando los individuos no sean de la misma especie.

$$\Delta^* = \frac{\sum \sum_{i < j} W_{ij} X_i X_j}{\sum \sum_{i < j} X_i X_j} = \frac{\sum W_k f_k}{\sum f_k}$$

Distintividad taxonómica promedio: Es la distancia taxonómica promedio de las ramas del árbol taxonómico mediante el cual se conectan todos los pares de especies registradas en una muestra y puede interpretarse como la amplitud taxonómica promedio de la muestra.

$$\Delta_+ = \frac{\sum \sum_{i < j} W_{ij} X_i X_j}{S(S - 1)/2}$$

Variación de la distintividad taxonómica (Lambda): Es la varianza de las distancias taxonómicas entre cada par de especies, que tiene la capacidad de distinguir diferencias entre la estructura taxonómica de las comunidades con algunos géneros que tengan alta riqueza de especies y otras con taxones superiores que tengan una o pocas especies.

$$\Lambda_+ = \frac{\sum \sum_{i < j} (W_{ij} - \Delta_+)^2}{S(S - 1)/2}$$

Donde:

X_i = Abundancia de i número de especies

W_{ij} = Peso dado por la distancia taxonómica que relaciona a las especies i y j en una jerarquía.

K = Número del nivel correspondiente a la jerarquía taxonómica

f_k = Sumatoria de los productos cruzados de los conteos de todos los pares de especies conectados en el mismo nivel jerárquico

W_k = Peso correspondiente a la distancia taxonómica

N = Número total de individuos en la muestra

S= Número de especies.

CANOCO (*Canonical Analysis of Principal Coordinates*): Es un análisis multivariado diseñado para detectar patrones de variación de los datos y que estén explicados de mejor modo por variables ambientales. Para obtener los valores numéricos y los diagramas de ordenación, las técnicas canónicas emplean una combinación de procedimientos regulares de ordenación y regresión múltiple. Los análisis canónicos se elaboraron con matrices de datos y con el programa PAST 3.1 que es un software libre. La solución del análisis de correspondencia canónica se puede mostrar en un diagrama de ordenación con sitios y especies representados por puntos y variables ambientales representadas por flechas o líneas. Los puntos de las especies y las flechas de las variables ambientales reflejan conjuntamente las distribuciones de las especies de manera positiva o negativa a lo largo de cada una de las variables ambientales.

PERMANOVA (análisis de varianza con permutaciones): Es una técnica multivariada que se basa en partición de la variación uni o multivariada, se construye a partir de distancias euclidianas y que con la hipótesis nula del ANOVA se crean permutaciones. La técnica necesita validaciones estadísticas que conformen el residuo de la valoración de p . La principal herramienta estadística fue PRIMER 7 + PERMANOVA, en donde primeramente los datos deben estar en matrices de abundancia por sitio, se transforman los datos de abundancia en raíz cuarta para reducir la distancia entre las especies más abundantes y las menos abundantes. Se realiza una matriz de semejanza con la distancia de Bray-Curtis obteniendo una matriz triangular. Se asignan los factores los cuales son valores cualitativos que se cuentan por la frecuencia de estos, se selecciona un tipo de error tres (permutación de residuos) de suma de cuadrados y se realiza una permutación con los residuos en un modelo reducido.

Al ser datos no paramétricos se tiene que evaluar con PERMDIST (Dispersión multivariada de permutaciones) que compara la varianza con respecto a los centroides de los grupos. Al ser datos con menos de 250 especies se realizó una prueba Monte Carlo con el que relacionan sitios y su mayor similitud. Finalmente se obtiene un gráfico PCO que relaciona los sitios y los agrupa.

CAPÍTULO 3

Resultados

Calidad del agua

Se encontró que en la mayoría de los sitios la clorofila *a* estuvo por debajo de detección del método, el valor máximo se encontró en Tulum 1 siendo la única medición para la localidad. La localidad de Playa del Carmen tuvo mediciones de clorofila para los tres sitios y tuvo el valor más alto de 40.89 mg/m³, mientras que las demás localidades sólo tuvieron mediciones en un sitio.

Para los nitritos se encontró que todas las mediciones fueron menores al límite máximo de los Criterios de Calidad CE-CCA-001/89 DOF: 13/12/1989. El valor más alto de nitritos fue en Tulum 7 con 0.3002 N-NO₂⁻ mg/L, mientras que el valor más bajo fue en Tulum 4 con 0.00573 NO₂⁻ mg/L (Tabla 3).

El valor más alto de nitratos se presentó en Tulum 7 con 0.8199 N-NO₃⁻ mg/L, mientras que el valor más bajo fue en Tulum 6 y Akumal 6 con 0.2291 N-NO₃⁻ mg/L. En otros sitios como Tulum 4, 5, Akumal 4 y 5 y Punta Nizuc 2 se obtuvieron valores por debajo del límite de detección. Para la localidad de Akumal la mitad de los sitios tuvieron concentraciones de amonio superiores a los criterios de calidad mientras que sitios en Akumal 1, 2 y 6, el valor más alto se obtuvo en Akumal 5 con 0.2702 N-NH₄⁺ mg/L. La localidad de Tulum tuvo sólo dos mediciones detectadas por el método de los siete sitios, en Tulum 1 y Tulum 6.

Para fosfatos todos los valores obtenidos rebasaron el límite de los criterios de calidad de agua CE-CCA-001/89, y el valor más alto de fosfatos fue en Tulum 7 con 0.4992 PO₄⁻³ mg/L y el mínimo fueron los valores no detectados por los métodos los cuales fueron Tulum 1 al 5, Akumal 1 y 2, Playa del Carmen 1 y 2.

La temperatura tuvo poca variación según Cherrinton *et al.*, (2008), el valor mínimo fue de 27°C y el máximo de 31°C, y la temperatura promedio fue de 29.5°C. La profundidad tuvo variaciones ya que los sitios de muestreo fueron aleatorios y no hubo un criterio para seleccionarlos, únicamente se confirmaba la existencia de estructuras coralinas, los sitios con profundidades de hasta 2 m fueron muestreados con buceo libre y los mayores a 2 m se utilizó equipo autónomo SCUBA, la profundidad promedio fue de 8.8 m, la mayor profundidad en Akumal 3 con 29 m y la menor en Akumal 1 con 1.5 m.

Tabla 3. Valores de los nutrientes del agua en los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Sitios	Clorofila a (mg/m ³)	N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ⁻³ (mg/L)	%O _d	T° °C	Prof. (m)
PN_1	*6.4	0.1190	0.6106	*0.002	*0.005	73	27°	10
PN_2	25.9281	0.0243	*0.2	0.0541	0.1153	79.3	27°	12
PN_3	*6.4	0.0150	0.5408	0.0164	0.0336	74.2	29°	8
PC_1	1.6038	0.0438	0.5175	0.0396	*0.005	77	29°	14
PC_2	0.2673	0.0271	0.5082	0.0031	*0.005	72	31°	9
PC_3	40.8969	0.0568	0.5827	0.0222	0.4993	75	31°	11
Akumal_1	0.891	0.0252	0.5082	*0.002	*0.005	93.2	30°	1.5
Akumal_2	*0.2	0.0308	0.5268	*0.002	*0.005	90	30°	2
Akumal_3	*0.2	*0.0075	0.3500	0.0466	0.1562	91.2	30°	29
Akumal_4	*0.2	*0.0075	*0.2	0.0583	0.1825	90.2	29°	2.5
Akumal_5	*0.2	*0.0075	*0.2	0.2703	0.0219	90.8	29°	18
Akumal_6	*0.2	*0.0075	0.2291	*0.002	0.0336	93.3	30°	14
Tulum_1	1.6038	*0.0075	0.5082	0.0168	*0.005	79.3	27°	12.13
Tulum_2	*0.4	0.0271	0.5268	*0.002	*0.005	89.5	30°	6.44
Tulum_3	*0.4	*0.0075	0.3500	*0.002	*0.005	82.8	30°	5.53
Tulum_4	*0.4	0.0057	*0.2	*0.002	*0.005	68.8	30°	2.18
Tulum_5	*0.4	*0.0075	*0.2	*0.002	*0.005	59.2	31°	3.8
Tulum_6	*0.4	0.0438	0.2291	*0.002	0.0088	64.1	31°	3.76
Tulum_7	*0.4	0.3002	0.8199	0.0545	0.0905	74.5	31°	2.5
CE-CCA-001/89	NA	0.002	0.04	0.01	0.002	95	+ 1.5°	NA

- PC: Playa del Carmen
- PN: Punta Nizuc
- Los valores con * fueron ajustados a ¼ de valor mínimo de detección en nitritos, nitratos y amonio, para fosfatos fue de ¼, para clorofila fue ¼ del valor mínimo ya que no hay curva de calibración.
- Los valores con negritas sobrepasan los límites permitidos por Normas mexicanas, criterios de calidad CE-CCA-001/89.
- Conversión de mg a µM para clorofila, nitritos, nitratos, amonio y fosfatos (Anexo 2).

El sitio de Tulum 7 presentó valores altos de nitritos y de nitratos, se observa un pico más alto que los demás sitios (Figura 6), este sitio se encuentra cercano a la costa y es el sitio

más al sur de todo el muestreo. Los sitios más cercanos al norte en Playa del Carmen y Punta Nizuc presentan un aumento de nitritos, nitratos y fosfatos, es decir en la mayoría de los sitios de estas localidades. De manera histórica se han encontrado en la literatura valores más altos en el norte de Quintana Roo. Finalmente se observa un pico de amonio en Akumal 5 mientras que en los demás sitios es bajo, lo que podría estar relacionado con la cercanía a la costa y la actividad turística que hay en ella.

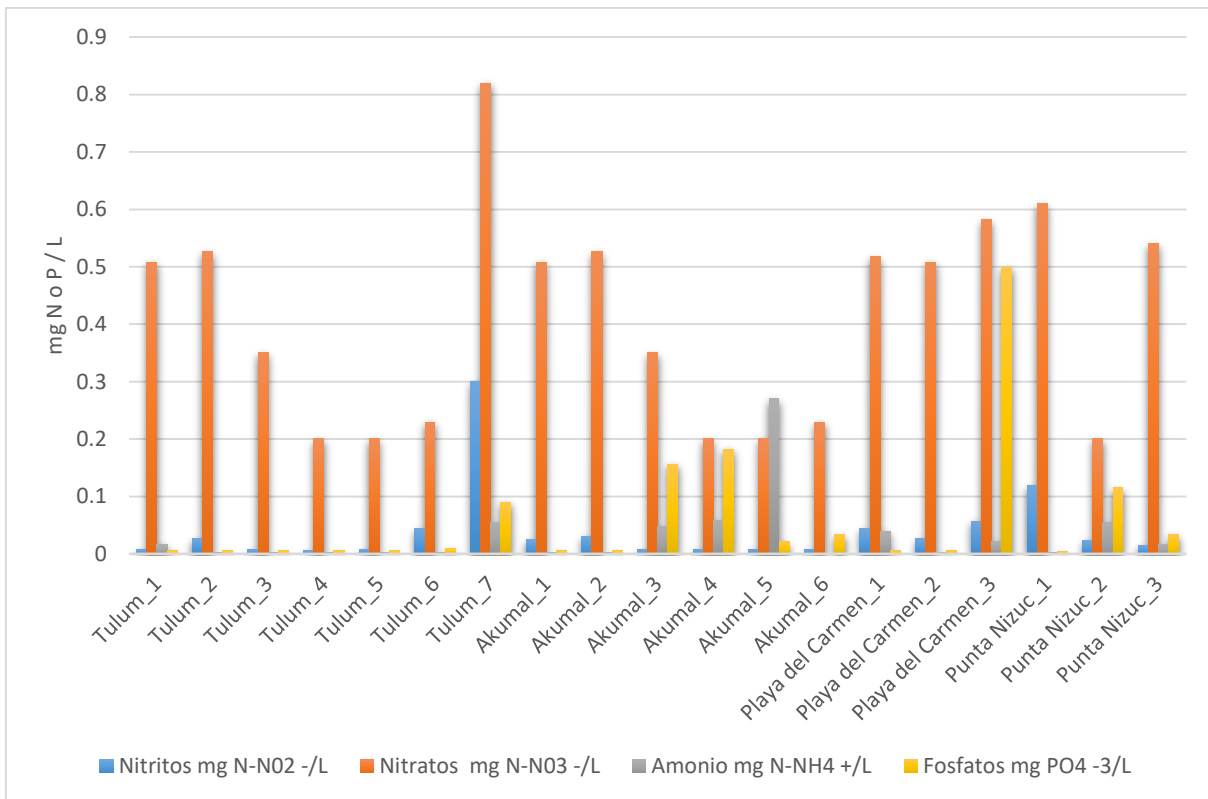


Figura 6. Nutrientes (sin el registro de clorofila) en los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

En la revisión de trabajos realizados en Quintana Roo, se obtuvo que los valores obtenidos de los trabajos previos son más altos en todos los nutrientes (Tabla 4). Es importante resaltar que únicamente Herrera-Silveira y colaboradores (2014) determinaron los nutrientes que se midieron en el presente estudio, otros autores no reportan clorofila, oxígeno disuelto y en algunos casos sólo dos especies de nitrógeno tal son los casos de Nuell y colaboradores (2014) y Hernández-Terrones y colaboradores (2011).

Tabla 4. Análisis comparativo de los valores con otros estudios en Quintana Roo

Autor	Localidad	Clorofila a mg/m³	N-NO₂⁻ μmol/L	N-NO₃⁻ μmol/L	N-NH₄⁺ μmol/L	PO₄⁻³ μmol/L
Pérez Torres, 2020	Tulum	0.57	1.24	8.80	0.25	0.39
Pérez Torres, 2020	Akumal	0.48	0.31	7.30	1.38	1.46
Pérez Torres, 2020	Playa del Carmen	14.25	0.93	11.65	0.47	3.69
Pérez Torres, 2020	Nizuc	12.9	1.15	9.79	0.53	1.11
Hernández- Terrones et al., 2011	Puerto Morelos	S/N	S/N	0.22	0.02	0.41
Mata-Lara, 2012	Akumal	S/N	0.08	67.2	17.5	0.5
Nuell et al., 2014	Cancún costa	S/N	S/N	0.7	7.1	0.7
Nuell et al., 2014	Cancún playa	S/N	S/N	43.3	4.3	0.8
Herrera-Silviera et al., 2014	Costa del Caribe (Nizuc)	0.35	0.21	1.9	2.4	0.6
Hernández- Terrones et al., 2015	Akumal	S/N	0.3 – 1.6	2.6 – 51.8	9.1 – 31.2	0.4 – 1.1

La localidad de Punta Nizuc se encuentra en el municipio de Benito Juárez en Cancún, el cual cuenta la mayor población con 743, 626 habitantes, la segunda con la mayor cantidad de volumen de agua descargada al acuífero ilegalmente con 18, 589, 645 m³ (Tabla 5). Las

localidades de Akumal y Playa del Carmen se encuentran en el municipio de Solidaridad con 209, 634 habitantes y con la mayor cantidad de volumen de agua descargada al acuífero ilegalmente con 45, 375, 218 m³. Finalmente, Tulum presenta un pequeño número de habitantes en comparación con las demás localidades, tiene 32, 714 habitantes y no hay volumen de agua descargado ilegalmente registrado para esta zona.

Tabla 5. Variables indirectas en la calidad del agua de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Localidad	Número de habitantes (INEGI 2019)	Descargas ilegales de agua m³ anuales (SENAPRED 2019)
Punta Nizuc	827,519	18589645
Playa del Carmen	221,166	45375218
Akumal	4,627	0
Tulum	22,596	0

Índice de calidad de agua TRIX

El índice de calidad de agua TRIX mostró que a nivel local Tulum y Akumal presentan estado trófico del agua mala ya que el valor de TRIX está en el rango de 4 a 5. Por otra parte, Playa del Carmen y Punta Nizuc presentan un estado trófico del agua pobre, es decir, presentan una condición con un alto contenido de nutrientes en el agua ya que el valor de TRIX fue mayor a seis (Tabla 6 y Figura 7). Se debe considerar a las mediciones como muestras instantáneas y que el resultado está sujeto a las descargas del continente, actividad turística, surgencias y a las corrientes marinas las cuales no se evaluaron este trabajo.

Tabla 6. Índice de calidad de agua TRIX por localidad. En amarillo mesotrófico y rojo oligotrófico.

Localidad	TRIX	Estado del Agua
Punta Nizuc	7.07	Pobre
Playa del Carmen	6.61	Pobre
Akumal	5.97	Mala
Tulum	5.47	Mala

A nivel de sitio se presenta una condición parecida a nivel localidad, en Punta Nizuc la condición del agua es pobre en todos los sitios, cabe resaltar en estos sitios se obtuvieron los valores más altos del índice TRIX. En Playa del Carmen 1 y 2 se identificó una condición mala y en Playa 3 una condición pobre. En Akumal no hay ningún sitio con una condición buena, Akumal 1,2, 5 y 6 tuvieron una condición mala y Akumal 3 y 4 una condición pobre. Finalmente, en Tulum cinco de los siete sitios tienen una condición mala, Tulum 4 y 5 tienen una condición buena y Tulum 7 una pobre condición (Tabla 7 y Figura 8). Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo se observan condiciones diferentes para el centro y para norte del Caribe mexicano, y el índice TRIX apoya esta idea.

Tabla 7. Índice de calidad de agua TRIX por sitio. En verde se presenta un estado eutrófico, amarillo mesotrófico y rojo oligotrófico.

Sitios	TRIX	Estado del Agua
Punta Nizuc_1	6.40	Pobre
Punta Nizuc_2	7.77	Pobre
Punta Nizuc_3	7.05	Pobre
Playa del Carmen_1	5.89	Mala
Playa del Carmen_2	5.18	Mala
Playa del Carmen_3	8.75	Pobre
Akumal_1	5.70	Mala
Akumal_2	5.42	Mala
Akumal_3	6.55	Pobre
Akumal_4	6.45	Pobre
Akumal_5	5.90	Mala
Akumal_6	5.81	Mala
Tulum_1	5.86	Mala
Tulum_2	5.41	Mala
Tulum_3	5.23	Mala
Tulum_4	4.97	Buena
Tulum_5	4.91	Buena
Tulum_6	5.24	Mala
Tulum_7	6.67	Pobre

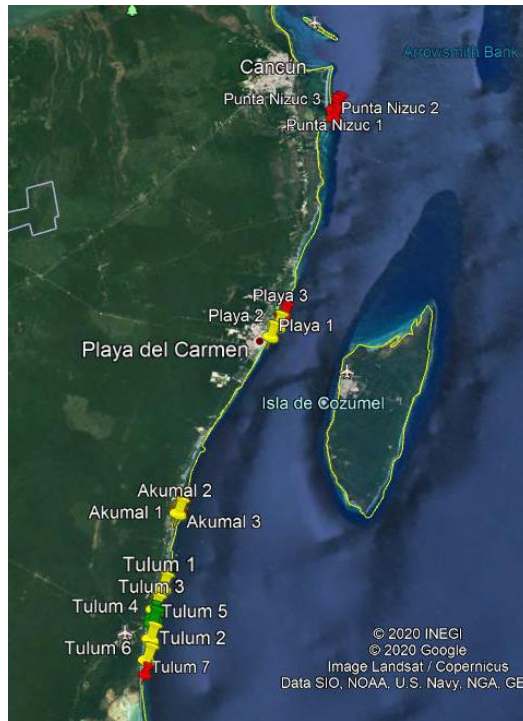


Figura 7. Calidad del agua de los sitios del centro y norte de Quintana Roo. En verde alta calidad y en amarillo buena calidad (Tomado de Google earth).



Figura 8. Calidad del agua de las localidades del centro y norte de Quintana Roo. En verde alta calidad y en amarillo buena calidad (Tomado de Google earth).

Análisis de bentos arrecifal

En las localidades del centro y norte de Quintana Roo el grupo bentónico más abundante fueron las macroalgas con 31.65 % y la roca coralina con 31.49 %, seguido de la arena con 18.01% y corales con 11.79 %, finalmente los grupos con menor porcentaje de cobertura fueron la pedacería de coralina 4.66 % y esponjas con 2.40 %.

La cobertura de macroalgas es mayor en el norte que en el centro de Quintana Roo, es decir, las macroalgas van en aumento de la localidad de Tulum hacia la localidad de Punta Nizuc, hay un aumento del 25.9% al 42.2%; Punta Nizuc es el sitio que tiene el mayor porcentaje de macroalgas. La localidad de Tulum, además de ser la localidad con menor porcentaje de algas, también es la localidad con mayor porcentaje de corales con 17.1%, seguida de Akumal con 12.9%, Punta Nizuc con un 9.6% y finalmente Playa del Carmen con 7.5% (Figura 9).

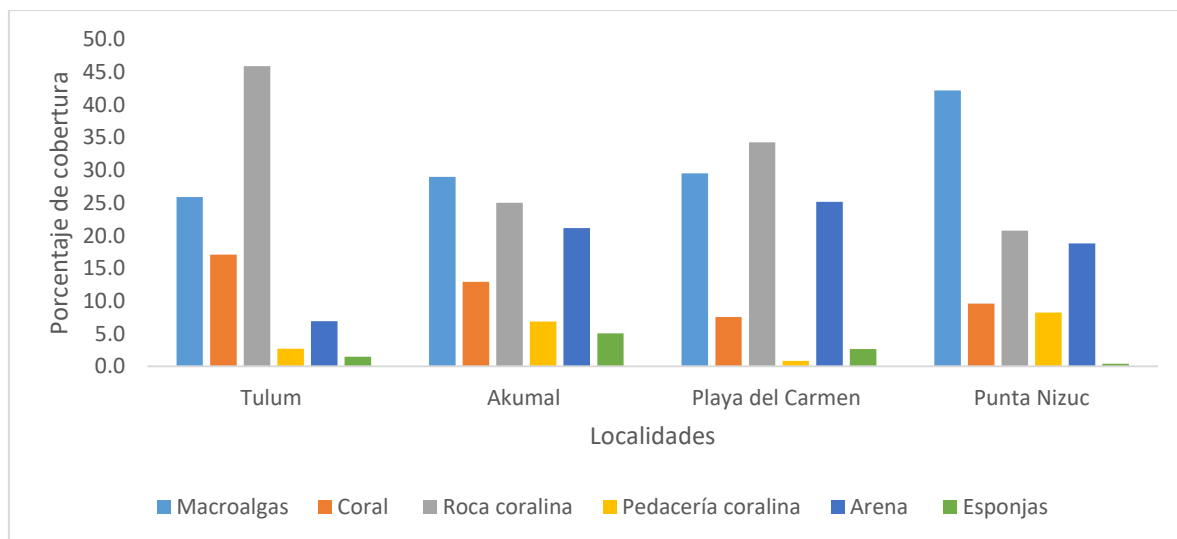


Figura 9. Grupos funcionales en la zona centro y norte de Quintana Roo

Se presenta una tendencia que al norte hay una baja cobertura de corales y una alta cobertura de macroalgas, mientras que en el centro de Quintana Roo se observa una tendencia inversa, una alta cobertura de corales y una baja cobertura de corales (Figura 10).

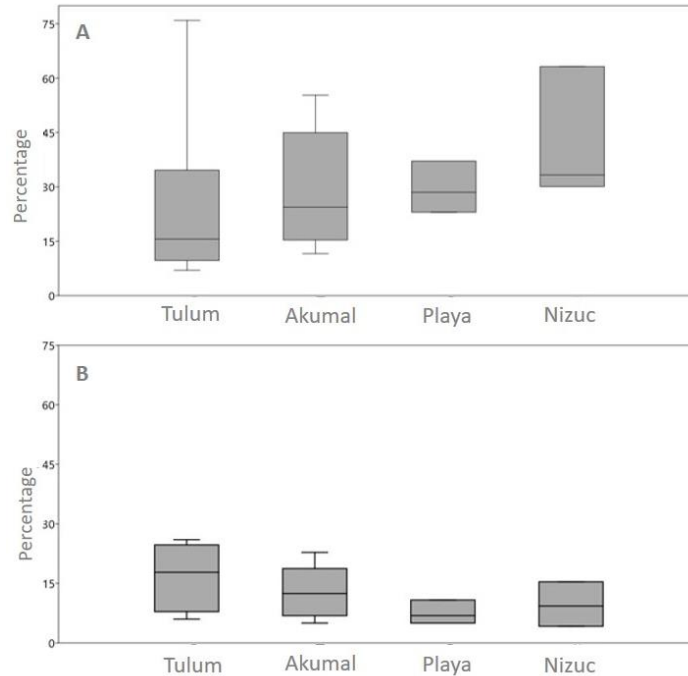


Figura 10. Gráfica de cajas y bigotes del porcentaje de cobertura de corales (a) y macroalgas (b).

En las cuatro localidades se registró una baja cobertura de esponjas, siendo Akumal la localidad con mayor porcentaje de esponjas con 5% y Punta Nizuc la localidad con menor porcentaje con 0.4%. En cuanto a la arena Playa del Carmen y Akumal presentan porcentajes arriba del 20%, Punta Nizuc un porcentaje del 18% y Tulum un porcentaje bajo en comparación con las demás localidades de 6.9%.

Análisis Coralino

Se registraron 25 especies de corales, pertenecientes a dos clases, tres órdenes, 11 familias y 18 géneros (Anexo 3). El grupo conocido como gorgonáceos fueron los más abundantes registrándose en la zona centro y norte de Quintana Roo.

En Punta Nizuc se registraron diez especies de corales, la especie con mayor cobertura fue de *Agaricia tenuifolia* con 13.91%, *Porites asteroides* 13.31% y *Acropora sp* 7.69%. Los géneros *Diploria* y *Siderastrea* representan menos del 3% de cobertura coralina (Figura 11).

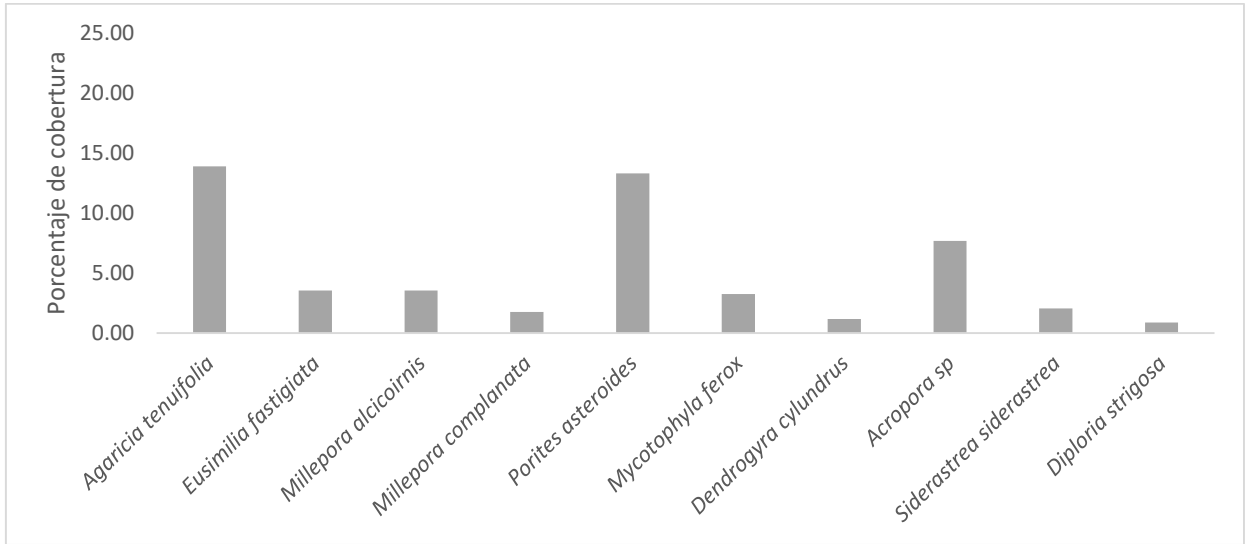


Figura 11. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Punta Nizuc.

En Playa del Carmen se registraron únicamente nueve especies de corales, *Agaricia tenuifolia* tuvo la mayor cobertura con 20.18%, seguida de *Millepora alcicornis* 11.11% y *Porites asteroides* 6.43. Los géneros de *Acropora*, *Siderastrea* y *Montastrea* tuvieron porcentajes bajos menores de 5% de cobertura (Figura 12).

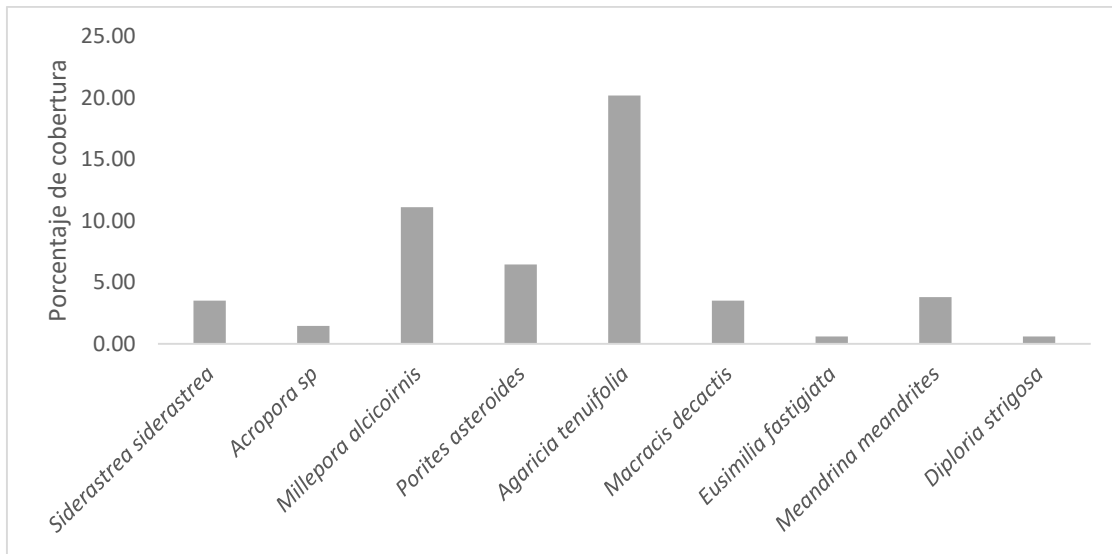


Figura 12. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Playa del Carmen.

En Akumal se registraron 18 especies siendo la especie de mayor porcentaje de cobertura *Mycetophyllia ferox* con 8.96%, seguida de *Agaricia tenuifolia* 6.3% y *Millepora alcicornis* 4.43%. El género *Acropora* tiene un porcentaje bajo (2.92 %) y *Siderastrea* y *Montastrea* 2.7% cada uno (Figura 13).

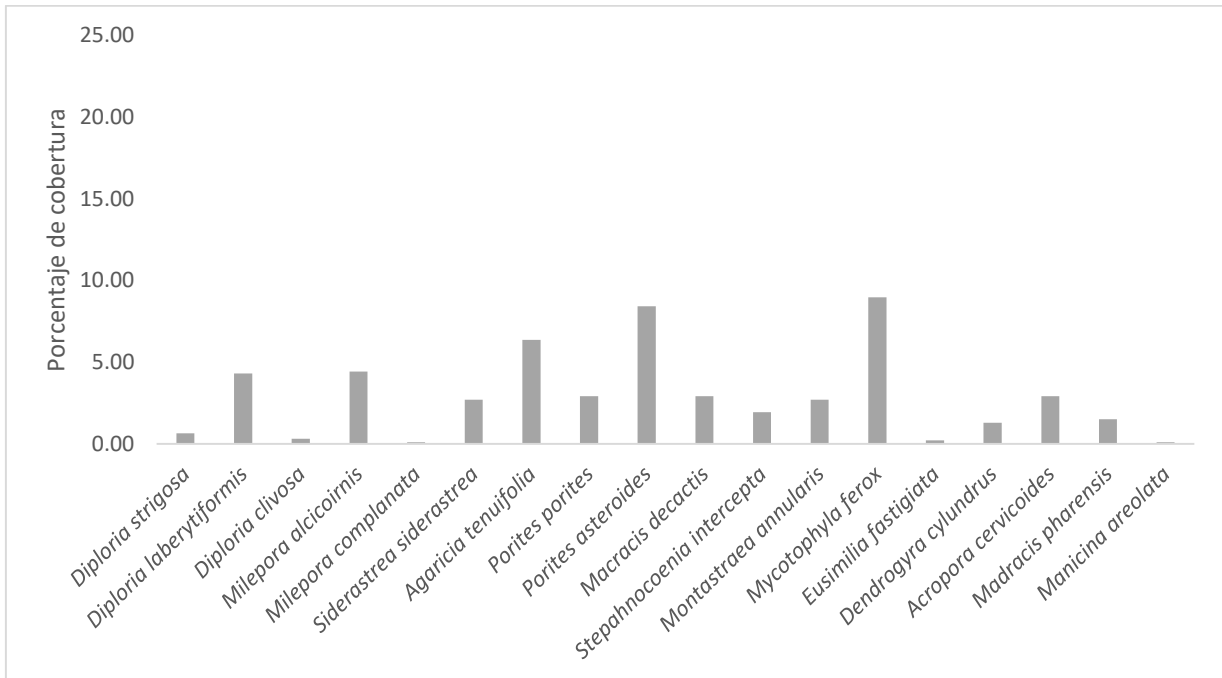


Figura 13. Cobertura de cada especie de corales en la localidad de Akumal.

Finalmente, la localidad de Tulum se registraron 19 especies de corales, la especie con mayor cobertura fue *Acropora palmata* 14.63%, seguida de *Millepora alccicornis* con 9.40%, *Siderastrea siderastrea* y *Diploria laberytiformis* ambas con 3.94% del porcentaje de la cobertura (Figura 14).

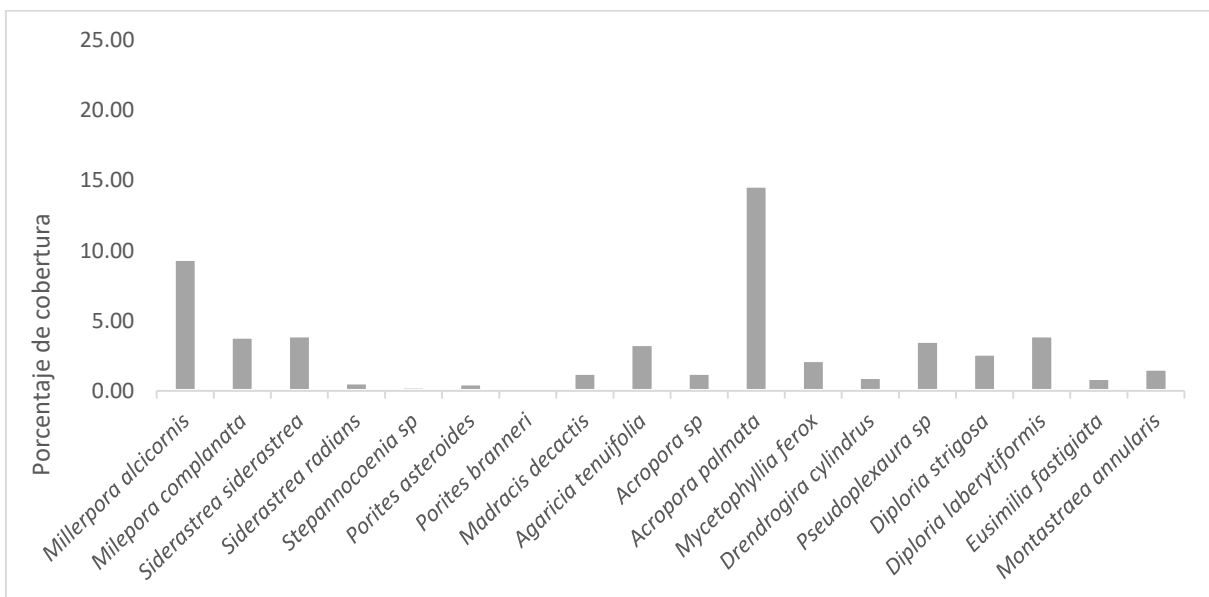


Figura 14. Cobertura de corales en la localidad de Tulum.

Algas

Se identificaron tres clases de macroalgas, 19 familias, 29 géneros y 46 especies (Anexo 4). Se identificaron cuatro grupos funcionales de macroalgas: carnosas, carnosas arraigadas, calcáreas y coralinas. Las algas carnosas tuvieron el mayor porcentaje con el 65%, seguido de las macroalgas calcáreas con el 15%, las algas coralinas tuvieron el 12% y finalmente las algas carnosas arraigadas registraron el 8% (Figura 15).

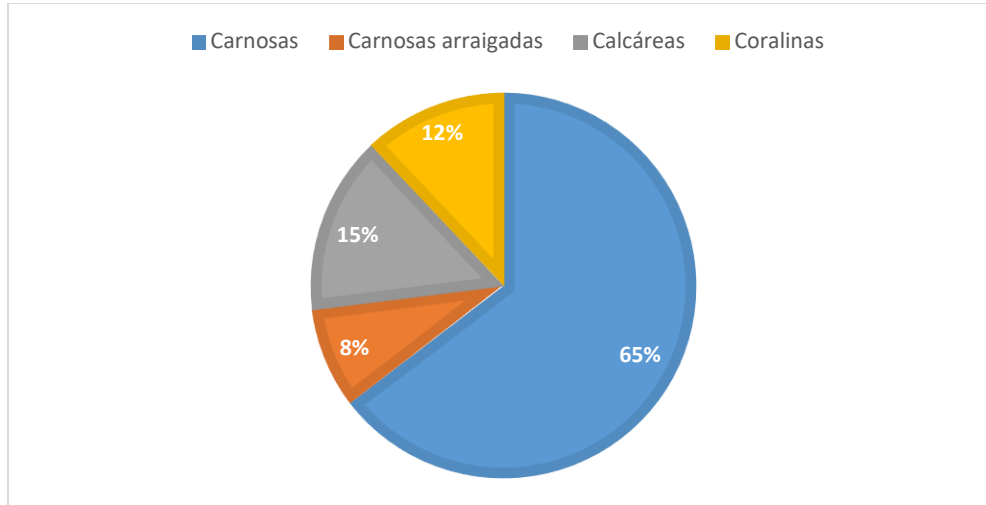


Figura 15. Porcentaje de grupos funcionales para los sitios de la región de centro y norte de Quintana Roo.

De acuerdo con el registro, las algas carnosas presentaron el mayor porcentaje de individuos en los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo. En la localidad de Tulum y Punta Nizuc se registraron 6016 y 6046 individuos de algas carnosas respectivamente, sin embargo, en Tulum se registra mayor cantidad de algas coralinas mientras que en Punta Nizuc la menor cantidad de algas coralinas de todas las localidades (Figura 16). En Akumal se registran la mayor cantidad de algas carnosas de todas las localidades, también se registró la mayor cantidad de algas calcáreas y la segunda de algas coralinas. Playa del Carmen registra la menor cantidad de algas de todas las localidades, podría deberse a que tiene un sustrato dominado por pedacería de coral o roca coralina.

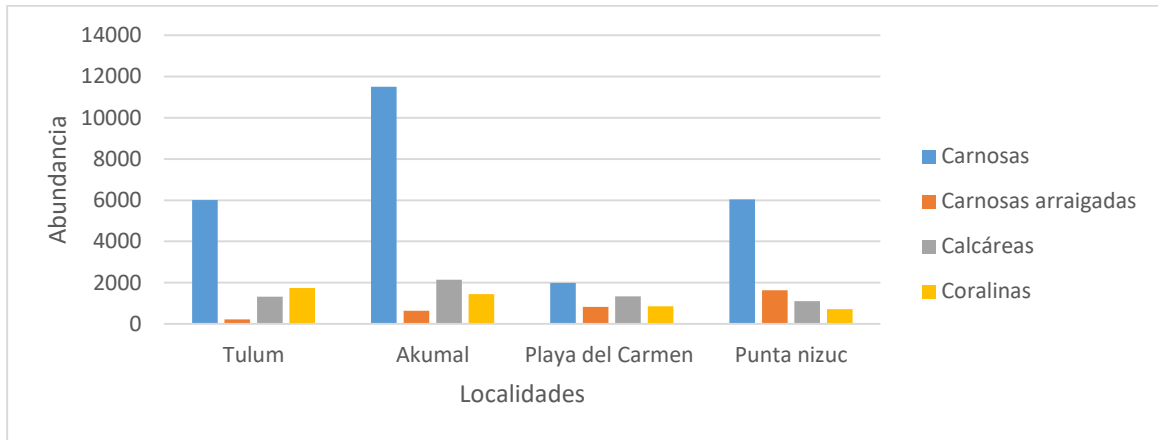


Figura 16. Grupos funcionales de algas para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Peces del centro y norte de Quintana Roo

Para todo el centro y norte de Quintana Roo se registraron 10277 individuos pertenecientes a dos clases, nueve órdenes, 35 familias, 55 géneros y 85 especies (Anexo 5). Se registraron 21 especies únicas, es decir que sólo se encontraron en un sitio, lo cual indica que pueden estar relacionadas a un tipo hábitat específico y que su distribución está limitada o bien que muestreo no pudo censar las especies en otros sitios. Se registraron 20 especies comunes, es decir, que fueron registradas en todos los sitios y se revisó con bases de datos confirmando la ampliación de su distribución (Tabla 8).

Tabla 8. Abundancia de peces por localidad del centro y norte de Quintana Roo. Se indica la familia, la especie y el número de organismos registrados por sitios según la clasificación de Nelson (2006), así como la importancia de las especies registradas: acuario (A), pesca artesanal de poco impacto o local (PA), pesca comercial de alto impacto o industrial (PC) e importancia ecológica (E). Tulum (T), Akumal (A), Playa del Carmen (P) y Punta Nizuc (N).

Especies	Familias	T	A	P	N	Importancia
<i>Urobatis jamaicensis</i> (Cuvier, 1816)	Urotrygonidae	0	0	5	0	A
<i>Synodus intermedius</i> (Spix & Agassiz, 1829)	Synodontidae	1	0	0	0	A
<i>Ablennes hians</i> (Valenciennes, 1846)	Belonidae	0	1	0	0	PC
<i>Holocentrus adscensionis</i> (Osbeck, 1765)	Holocentridae	23	6	14	0	PC y A

Continuación

<i>Aulostomus maculatus</i> Valenciennes, 1841	Aulostomidae	0	0	1	3	PC y A
<i>Scorpaena plumieri</i> Bloch, 1789	Scorpaenidae	0	1	0	0	A
<i>Serranus tigrinus</i> (Bloch, 1790)	Serranidae	1	11	4	0	E y A
<i>Cephalopholis fulva</i> (Linnaeus, 1758)	Serranidae	2	0	0	0	E, PC y A
<i>Cephalopholis cruentata</i> (Lacepède, 1802)	Serranidae	5	4	0	0	E y PA
<i>Hypoplectrus nigricans</i> (Poey, 1852)	Serranidae	0	2	0	0	E y A
<i>Hypoplectrus puella</i> (Cuvier, 1828)	Serranidae	0	3	0	0	E y A
<i>Hypoplectrus indigo</i> (Poey, 1851)	Serranidae	0	0	0	2	E y A
<i>Mycteroperca venenosa</i> (Linnaeus, 1758)	Serranidae	0	0	0	1	E y A
<i>Gramma loreto</i> Poey, 1868	Grammatidae	0	25	0	0	A
<i>Caranx crysos</i> (Mitchill, 1815)	Carangidae	18	126	0	0	PC y PA
<i>Caranx ruber</i> (Bloch, 1793)	Carangidae	9	22	8	0	PC y PA
<i>Carangoides bartholomaei</i> (Cuvier, 1833)	Carangidae	0	0	0	14	PC y PA
<i>Lutjanus analis</i> (Cuvier, 1828)	Lutjanidae	1	5	0	0	E, PC y PA
<i>Lutjanus apodus</i> (Walbaum, 1792)	Lutjanidae	1	8	1	4	E, A, PC y PA
<i>Lutjanus mahogoni</i> (Cuvier, 1828)	Lutjanidae	32	39	15	13	E y PA
<i>Lutjanus griseus</i> (Linnaeus, 1758)	Lutjanidae	8	10	16	70	E y PA
<i>Lutjanus jocu</i> (Bloch & Schneider, 1801)	Lutjanidae	34	2	121	0	E, A y PA
<i>Lutjanus synagris</i> (Linnaeus, 1758)	Lutjanidae	0	2	0	0	E y PA
<i>Ocyurus chrysurus</i> (Bloch, 1791)	Lutjanidae	0	40	0	0	A y PA
<i>Gerres cinereus</i> (Walbaum, 1792)	Gerreidae	6	30	40	34	A y PA

Continuación

<i>Anisotremus surinamensis</i> (Bloch, 1791)	Haemulidae	2	9	0	9	PA
<i>Anisotremus virginicus</i> (Linnaeus, 1758)	Haemulidae	3	3	16	14	A y PA
<i>Haemulon sciurus</i> (Shaw, 1803)	Haemulidae	3	36	49	6	E y PA
<i>Haemulon chrysargyreum</i> Günther, 1859	Haemulidae	11	14	0	38	E, A y PA
<i>Haemulon flavolineatum</i> (Desmarest, 1823)	Haemulidae	30	174	41	0	E, A y PA
<i>Haemulon macrostomum</i> Günther, 1859	Haemulidae	3	0	0	0	E, A y PA
<i>Haemulon plumierii</i> (Lacepède, 1801)	Haemulidae	6	29	22	31	E, A y PA
<i>Haemulon carbonarium</i> Poey, 1860	Haemulidae	165	46	0	35	E, A y PA
<i>Calamus nodosus</i> Randall & Caldwell, 1966	Sparidae	0	0	0	4	E, A y PA
<i>Odontoscion dentex</i> (Cuvier, 1830)	Sciaenidae	0	0	0	2	A y PA
<i>Pseudupeneus maculatus</i> (Bloch, 1793)	Mullidae	0	10	0	0	PA
<i>Mulloidichthys martinicus</i> (Cuvier, 1829)	Mullidae	3	3	16	0	PA
<i>Pempheris schomburgkii</i> Müller & Troschel, 1848	Pempheridae	0	1	16	6	A y PA
<i>Chaetodon ocellatus</i> Bloch, 1787	Chaetodontidae	21	9	0	0	PA
<i>Chaetodon striatus</i> Linnaeus, 1758	Chaetodontidae	2	3	9	0	A
<i>Chaetodon capistratus</i> Linnaeus, 1759	Chaetodontidae	9	5	11	2	A
<i>Prognathodes aculeatus</i> (Poey, 1860)	Chaetodontidae	16	7	9	8	A
<i>Holacanthus ciliaris</i> (Linnaeus, 1758)	Pomacanthidae	0	2	0	0	E y A
<i>Holacanthus tricolor</i> (Bloch, 1795)	Pomacanthidae	2	0	4	2	E y A
<i>Pomacanthus paru</i> (Bloch, 1787)	Pomacanthidae	15	8	9	2	E, A y PA

Continuación

<i>Kyphosus sectatrix</i> (Linnaeus, 1758)	Kyphosidae	27	35	7	64	E, A y PA
<i>Chromis cyanea</i> (Poey, 1860)	Pomacentridae	40	172	44	34	A y PA
<i>Stegastes partitus</i> (Poey, 1868)	Pomacentridae	173	212	25	64	A y PA
<i>Stegastes adustus</i> (Troschel, 1865)	Pomacentridae	238	323	58	50	A
<i>Stegastes planifrons</i> (Cuvier, 1830)	Pomacentridae	147	14	0	23	A
<i>Stegastes leucostictus</i> (Müller & Troschel, 1848)	Pomacentridae	0	31	0	9	A
<i>Microspathodon chrysurus</i> (Cuvier, 1830)	Pomacentridae	67	43	0	21	A
<i>Abudefduf saxatilis</i> (Linnaeus, 1758)	Pomacentridae	84	290	107	108	A
<i>Bodianus rufus</i> (Linnaeus, 1758)	Labridae	1	13	6	4	E, A y PA
<i>Thallasoma bifasciatum</i> (Bloch, 1791)	Labridae	586	656	225	351	E, A y PA
<i>Halichoeres</i> <i>garnoti</i> (Valenciennes, 1839)	Labridae	55	609	15	92	E, A y PA
<i>Halichoeres bivittatus</i> (Bloch, 1791)	Labridae	343	0	162	0	E y A
<i>Clepticus parrae</i> (Bloch & Schneider, 1801)	Labridae	0	136	24	0	A
<i>Scarus vetula</i> Bloch & Schneider, 1801	Scaridae	13	4	4	0	E y A
<i>Scarus taeniopterus</i> Lesson, 1829	Scaridae	6	0	19	4	E, A y PA
<i>Scarus iseri</i> (Bloch, 1789)	Scaridae	0	75	0	4	E, A y PA
<i>Sparisoma rubripinne</i> (Valenciennes, 1840)	Scaridae	65	70	21	11	E, A y PA
<i>Sparisoma</i> <i>aurofrenatum</i> (Valenciennes, 1840)	Scaridae	138	26	10	9	E, A y PA
<i>Sparisoma viride</i> (Bonnaterre, 1788)	Scaridae	60	38	26	15	E, A y PA
<i>Malacoctenus triangulatus</i> Springer, 1959	Labrisomidae	85	2	0	0	A y PA

Continuación

<i>Malacanthus plumieri</i> (Bloch, 1786)	Labrisomidae	1	0	0	6	A y PA
<i>Emblemaria sp.</i>	Chaenopsidae	3	0	0	0	A
<i>Ophioblennius macclurei</i> (Silvester, 1915)	Blenniidae	3	0	0	0	E y PC
<i>Elacatinus oceanops</i> Jordan, 1904	Gobiidae	3	0	0	0	A
<i>Coryphopterus glaucofraenum</i> Gill, 1863	Gobiidae	11	21	4	0	A
<i>Acanthurus tractus</i> Poey, 1860	Acanthuridae	214	327	159	70	E y A
<i>Acanthurus chirurgus</i> (Bloch, 1787)	Acanthuridae	57	50	0	23	E y A
<i>Acanthurus coeruleus</i> Bloch & Schneider, 1801	Acanthuridae	386	252	183	93	E, A y PA
<i>Sphyraena barracuda</i> (Edwards, 1771)	Sphyraenidae	0	0	0	4	E, A y PA
<i>Scomberomorus regalis</i> (Bloch, 1793)	Scombridae	3	0	0	0	A y PA
<i>Bothus maculiferus</i> (Poey, 1860)	Bothidae	1	0	0	0	E, PC y PA
<i>Melichthys niger</i> (Bloch, 1786)	Balistidae	12	0	0	0	PC y PA
<i>Canthidermis sufflamen</i> (Mitchill, 1815)	Balistidae	4	1	1	0	E y PA
<i>Balistes vetula</i> Linnaeus, 1758	Balistidae	2	0	2	0	E, A y PC
<i>Cantherhines pullus</i> (Ranzani, 1842)	Monacanthidae	2	5	0	0	A, PC y PA
<i>Lactophrys triqueter</i> (Linnaeus, 1758)	Ostraciidae	0	5	6	2	A, PC y PA
<i>Acanthostracion quadricornis</i> (Linnaeus, 1758)	Ostraciidae	0	2	0	0	A
<i>Canthigaster rostrata</i> (Bloch, 1786)	Tetraodontidae	3	25	0	0	A
<i>Diodon holocanthus</i> Linnaeus, 1758	Diodontidae	1	0	0	0	A

Acumulación de especies de peces

Para la comunidad de peces la riqueza observada fue de 84 especies a nivel regional, la suma de las riquezas de las localidades. Bootstrap y Chao 1 estiman 80 y 88 especies, sin embargo, Chao 2 y Jackknife 1 y 2 estiman más de 100 especies. Cabe destacar que la curva de Jackknife tiende a sobreestimar el número de especies y es comúnmente utilizado en cuadrantes, al igual que Bootstrap (Figura 17).

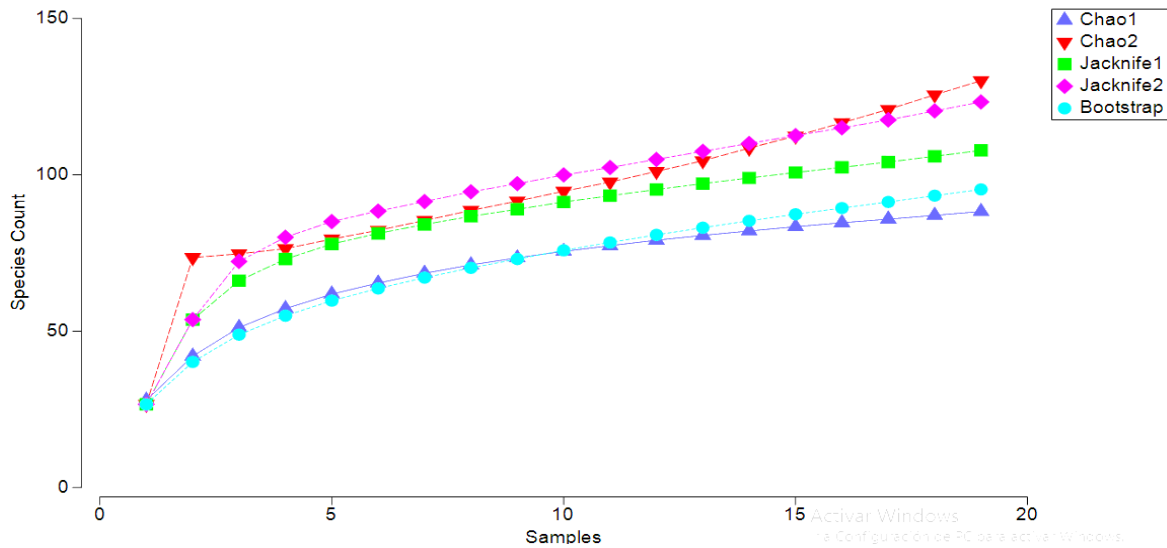


Figura 17. Índices de rarefacción de la riqueza de especies de peces para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Distribución de los peces

En Punta Nizuc, se muestrearon tres sitios y se registraron un total de 1396 individuos de peces, separados en 16 familias, 26 géneros y 45 especies. Las familias con mayor número de especies fueron Haemulidae y Pomacentridae con siete, seguida de Scaridae con cinco y Lutjanidae con cuatro, el resto de las familias registraron menos de tres especies. La especie más abundante al igual que en los otros sitios fue *Thalassoma bifasciatum* con 351 individuos, seguida de *Abudefduf saxatilis* con 108 y *Halichoeres garnoti* con 92 individuos. Esta localidad registró el menor registro de peces de todas las localidades.

En Playa del Carmen, se muestrearon tres sitios y para el caso de peces se registraron 1577 individuos pertenecientes a 16 familias, 29 géneros y 43 especies. Las familias con mayor número de especies fueron Labridae, Scaridae y Lutjanidae con cinco cada una, seguida de Pomacentridae, Chetodontidae con tres y Haemulidae con cuatro especies, el resto de las familias tuvieron menos de dos especies por familia. *Thalassoma bifasciatum*

fue la especie más abundante, seguida de *Acanthurus tractus*, *Acanthurus coeruleus*, *Halichoeres bivittatus*, *Abudefduf saxatilis* y *Lutjanus griseus* tuvieron un registro de entre 100 y 200 individuos. Se registraron tres especies en un solo sitio y se registró una rara, siendo un total de cuatro las especies consideradas como no abundantes

En Akumal, se registraron 4151 individuos de peces, en seis sitios. Se identificaron 24 familias, 41 géneros y 63 especies. La familia con mayor número de especies fue Lutjanidae con siete, seguida de Pomacentridae y Chaetodontidae con seis. Akumal fue la localidad con mayor número de registros siendo las especies más abundantes *Thalassoma bifasciatum* y *Halichoeres garnoti* con 656 y 609 individuos respectivamente. Se registraron cuatro especies en un solo sitio y cinco especies raras, siendo nueve especies las menos abundantes.

En Tulum se muestrearon siete sitios, se registraron 3282 individuos de peces correspondientes a una clase, 28 familias, 41 géneros y 63 especies. La familia con el mayor registro de especies fue Haemulidae con ocho, seguida de Pomacentridae con seis y Scaridae y Lutjanidae con cinco especies (Figura 18). *Thalassoma bifasciatum* tuvo la mayor abundancia con 586 individuos, seguida de *Acanthurus coeruleus* y *Halichoeres bivittatus* con 386 y 343 individuos respectivamente. Se registraron ocho especies en un solo sitio y cuatro especies denominadas como raras y poco abundantes.

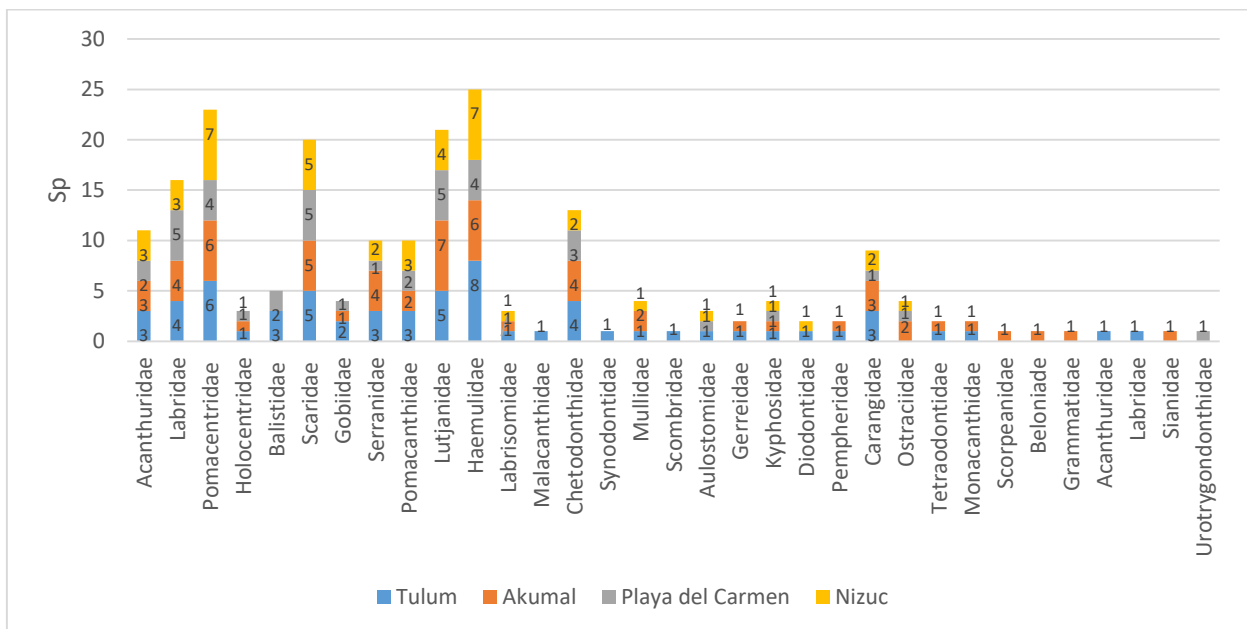


Figura 18. Familias de peces registrados para los sitios de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Los hábitos alimenticios en los peces se dividieron en cinco categorías: carnívoros, herbívoros, omnívoros, planctívoros y detritívoro (Figura 19). Se registró que las especies carnívoras ocuparon el mayor porcentaje con un 63% en relación con todas especies, mientras que otra categoría importante los herbívoros ocuparon únicamente el 13% de las especies.

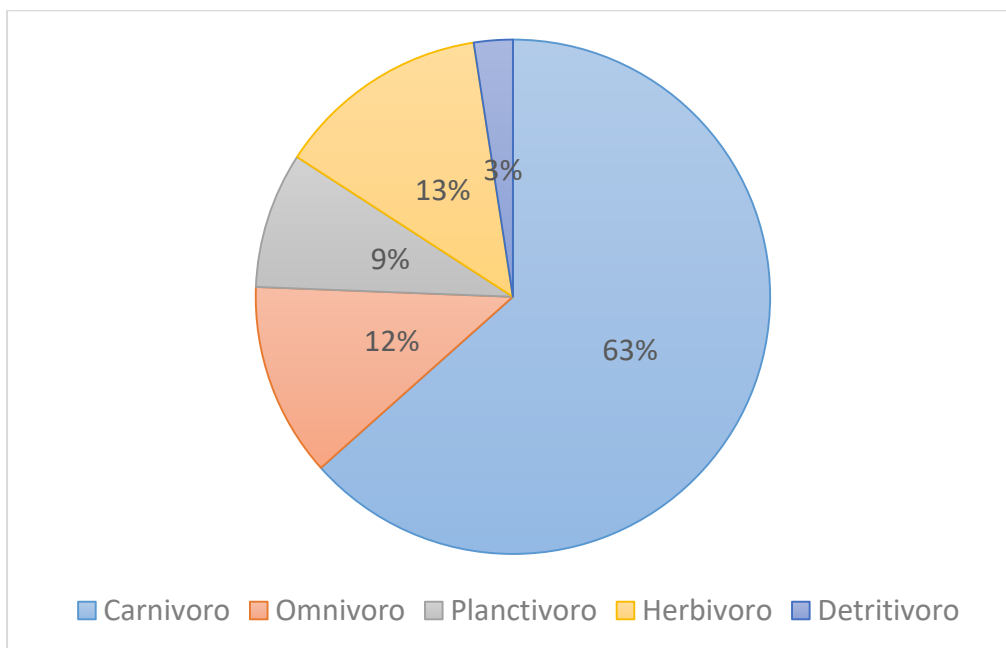


Figura 19. Hábitos alimenticios de los peces registrados en la zona centro y norte de Quintana Roo.

Registros bibliográficos de peces para la zona de estudio, zona centro y norte de Quintana Roo.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en listados de tesis, artículos y bases de datos sobre los registros de peces, con el fin de obtener la lista puntual de especies y los sitios de distribución en la zona de estudio. La revisión bibliográfica no registra algunas especies en los sitios de muestreo de la presente investigación, por lo que se puede considerar el presente trabajo como un registro de la ampliación de la zona de distribución de algunas especies (Anexo 6).

Para las localidades de Tulum y Punta Nizuc se identificaron 36 y 37 especies de peces que no se tenían registros en la zona, todos ellos ya registros para Quintana Roo, excepto *Calamus nodosus* la cual tiene reportes oficiales solo en el Golfo de México y las bases de datos indican que el Caribe mexicano es parte de su distribución, por lo tanto, se debe verificar si no está aún registrada la especie en la zona. La localidad mejor estudiada en cuanto a su ictiofauna es Akumal, únicamente 13 especies no tenían registro en la zona. La localidad con menos estudios fue Playa del Carmen ya que las 43 especies que se registraron son ampliación de su distribución al no haber estudios previos en la zona

Lutjanus jocu es un registro nuevo para la zona centro de Quintana Roo, fue un registro más bien raro y la especie no está reportado para la zona norte de Quintana Roo, pero si para el sur. Por otro lado, *Chromis cyanea* no tiene registros en ninguna localidad de la zona de estudio, pero sí ha sido registrado en Puerto Morelos y zonas sur.

Análisis de porcentaje de similitud de los peces en las localidades del muestreo

Para el grupo de peces el porcentaje de contribución fue integrado por un mayor número de especies que en el grupo de moluscos. Para todas las localidades la especie *T. bifasciatum* fue la especie con el mayor porcentaje de contribución a la comunidad, con un 6.78 % en Tulum, 12.04 % en Akumal, 6.78% en Playa del Carmen y 11.63 % en Punta Nizuc, siendo Akumal la localidad donde representa la mayor similitud (Tabla 9). Las especies *A. coeruleus*, *H. garnoti* y *S. viride* fueron las especies clave para todas las localidades del norte de Quintana Roo, pero con un porcentaje menor que *T. bifasciatum*. *Sparisoma viride*, *Sparisoma rubripinne*, *Scarus taeniopterus*, *Scarus iseri* fueron especies claves y reportadas en la literatura como especies importantes para el mantenimiento del arrecife.

Tabla 9. Análisis SIMPER de las especies que contribuyen con más de un 70% a las diferencias por localidad de peces.

Especies por localidad	Porcentaje de abundancia	Porcentaje de similitud	Porcentaje de contribución	Porcentaje de contribución acumulado
Punta Nizuc				
Especies clave				
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	2.24	6.73	11.63	11.63
<i>Acanthurus coeruleus</i>	1.61	4.78	8.26	19.89
<i>Halichoeres garnoti</i>	1.6	4.77	8.24	28.13
<i>Stegastes partitus</i>	1.46	4.41	7.62	35.75
<i>Acanthurus tractus</i>	1.45	4.07	7.04	42.79
<i>Ocyurus chrysurus</i>	1.23	3.5	6.06	48.85
<i>Haemulon carbonarium</i>	1.26	3.5	6.04	54.89
<i>Caranx ruber</i>	1.22	3.35	5.79	60.68
<i>Sparisoma viride</i>	1.02	2.95	5.1	65.78
<i>Lutjanus apodus</i>	0.98	2.87	4.96	70.74
Playa del Carmen				
Especies clave				
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	2.01	5.09	6.78	6.78
<i>Halichoeres bivittatus</i>	1.79	4.65	6.2	12.98
<i>Habudeudus saxatilis</i>	1.62	4.14	5.51	18.49
<i>Lutjanus griseus</i>	1.66	4.11	5.47	23.96
<i>Acanthurus coeruleus</i>	1.73	3.94	5.25	29.21
<i>Stegastes adustus</i>	1.39	3.52	4.69	33.9
<i>Chromis cyanea</i>	1.3	3.37	4.49	38.39
<i>Haemulon flavolineatum</i>	1.26	3.2	4.26	42.65
<i>Ocyurus chrysurus</i>	1.26	3.16	4.21	46.86
<i>Haemulon sciurus</i>	1.31	3.13	4.17	51.03
<i>Sparisoma viride</i>	1.13	2.9	3.86	54.89
<i>Sparisoma rubripinne</i>	1.08	2.82	3.76	58.65
<i>Haemulon plumierii</i>	1.09	2.73	3.64	62.29
<i>Scarus taeniopterus</i>	1.05	2.65	3.53	65.82
<i>Pseudupeneus maculatus</i>	1	2.59	3.46	69.28
<i>Halichoeres garnoti</i>	0.99	2.54	3.38	72.66
Akumal				
Especies clave				
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	1.99	6.25	12.04	12.04
<i>Halichoeres garnoti</i>	1.93	5.8	11.18	23.22

Continuación

<i>Acanthurus tractus</i>	1.64	5.09	9.8	33.02
<i>Acanthurus coeruleus</i>	1.37	3.41	6.57	39.59
<i>Haemulon flavolineatum</i>	1.2	2.84	5.47	45.06
<i>Sparisoma viride</i>	0.96	2.83	5.45	50.51
<i>Stegastes partitus</i>	1.19	2.42	4.66	55.17
<i>Bodianus rufus</i>	0.73	2.15	4.14	59.31
<i>Scarus iseri</i>	0.93	2.07	3.99	63.3
<i>Stegastes adustus</i>	1.13	1.84	3.54	66.84
<i>Caranx ruber</i>	0.74	1.81	3.49	70.33
Tulum				
Especies clave				
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	2.01	5.09	6.78	6.78
<i>Halichoeres bivittatus</i>	1.79	4.65	6.2	12.98
<i>Habudeudus saxatilis</i>	1.62	4.14	5.51	18.49
<i>Lutjanus griseus</i>	1.66	4.11	5.47	23.96
<i>Acanthurus coeruleus</i>	1.73	3.94	5.25	29.21
<i>Stegastes adustus</i>	1.39	3.52	4.69	33.9
<i>Chromis cyanea</i>	1.3	3.37	4.49	38.39
<i>Haemulon flavolineatum</i>	1.26	3.2	4.26	42.65
<i>Ocyurus chrysurus</i>	1.26	3.16	4.21	46.86
<i>Haemulon sciurus</i>	1.31	3.13	4.17	51.03
<i>Sparisoma viride</i>	1.13	2.9	3.86	54.89
<i>Sparisoma rubripinne</i>	1.08	2.82	3.76	58.65
<i>Haemulon plumierii</i>	1.09	2.73	3.64	62.29
<i>Scarus taeniopterus</i>	1.05	2.65	3.53	65.82
<i>Pseudupeneus maculatus</i>	1	2.59	3.46	69.28
<i>Halichoeres garnoti</i>	0.99	2.54	3.38	72.66

Análisis de diversidad en peces

El análisis de diversidad en los peces se obtuvo con el índice de Shannon-Wiener. En todas las localidades el valor de diversidad fue alto, tomando en cuenta que según el índice valores mayores a 2.8 bits/individuo en comunidades acuáticas se considera alto. La mayor diversidad se encontró en Akumal con 4.348 bits/ind, mientras que el menor fue en Punta Nizuc con 4.263 bits/ind la localidad más al norte de Quintana Roo. La equitatividad de Pielou J' presento que todas las localidades están en el rango de 0.5, por lo que se entiende como una equitatividad media, la diversidad está distribuida en algunas especies dominantes, con muchas especies con abundancias que ronda en la media (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis de diversidad de peces por localidad de la zona centro y norte de Quintana Roo. La abundancia representa el número de organismos y la riqueza en número de especies.

Localidades	Riqueza (número de especies)	Abundancia (número de individuos)	Shannon-Wiener H' bits/ind	Pielou J' H'max
Nizuc	45	1396	4.263	0.589
Playa del Carmen	43	1577	4.296	0.583
Akumal	62	4151	4.348	0.522
Tulum	63	3282	4.310	0.532

Se utilizó el estadístico de t de Hutchenson para comparar el índice de diversidad de Shannon-Wiener entre las localidades, considerando que si Tt (T tabla) es mayor que p (valor de significancia) no hay diferencias entre las diversidades, sin embargo, si Tt es menor que p existen diferencias significativas entre sus diversidades. Se encontró que las localidades con diferencias significativas son Playa del Carmen con Tulum y Playa del Carmen con Punta Nizuc según su diversidad, ya que la Tt es menor que el valor de p ; el resto de las localidades no tuvieron diferencias significativas por lo que la diversidad no es diferente entre las localidades (Tabla 11).

Tabla 11. Análisis comparativo de t de Hutchenson con los valores de diversidad de Shannon-Wiener (bits/ind) de peces entre localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo. Tc (t calculada) y p (valor de significancia).

Peces	Tulum		Akumal		Playa	
	Tt	p	Tt	p	Tt	p
Nizuc	0.86	0.39	1.85	0.06	0.54	0.59
Playa	0.29	0.77	1.37	0.17		
Akumal	1.29	0.2				

Diversidad taxonómica de los peces

Para el grupo de los peces para el norte de Quintana Roo se obtuvo un valor de diversidad taxonómica (Δ) de 99.438 y de distinción taxonómica (Λ^+) de 158.12 con valor de $p < 0.05$

por lo que indica que es estadísticamente significativo. La distinción taxonómica (Δ^*) fue menor que promedio en aproximadamente cinco unidades.

A nivel local para el grupo de peces se obtuvo que Akumal presenta el valor más alto de Delta con 57.276 unidades, seguido de Playa del Carmen y Nizuc con 35.905 y 34.014 unidades y finalmente Tulum presentó el valor más bajo con 31.697 unidades (Tabla 12).

En cuanto a la distinción taxonómica Tulum presentó el valor más alto con 97.499 unidades, por lo tanto, tiene sobre-representación de los taxa de peces. Akumal es la segunda localidad con un valor alto de Λ^+ y Playa y Nizuc con valores muy parecidos tienen poca representación de los taxa del grupo.

Tabla 12. Valores de índices taxonómicos de los peces en la zona centro y norte de Quintana Roo.

Localidades	Diversidad taxonómica promedio (Delta Δ)	Distintividad taxonómica (Δ^*)	Distinción taxonómica promedio (Lambda+ o Λ^+)	Variación de distinción (VarTD)
Nizuc	34.014	52.889	58.78	235.12
Playa del Carmen	35.905	58.591	58.654	234.62
Akumal	57.276	99.329	96.409	385.64
Tulum	31.697	49.094	97.499	389.99

Diversidad de los peces a escala espacial

Todos los sitios tienen valores de H' mayores a 2.8 bits/ind considerándose como una diversidad alta. La equitatividad es mayor a 0.5 en todos los sitios, por lo que se considera que hay muchas especies con poca abundancia y hay varias especies dominantes. El sitio con mayor diversidad fue el sitio denominado como Playa 2 (Playa del Carmen) así como también el sitio con mayor riqueza, sin embargo, el sitio con mayor abundancia fue Akumal 4 con 949 individuos, por otra parte, el sitio con menor diversidad y abundancia fue Tulum 1 con 3.26 bits/indv y 218 ind (Tabla 13).

Tabla 13. Diversidad de peces registrados por sitio en la zona centro y norte de Quintana Roo. La abundancia representa el número de organismos y la riqueza en número de especies.

Sitio	Riqueza (número de especies)	Abundancia (número de individuos)	Shannon- Wiener H' bits/ind	Pielou J' H'max
Nizuc 1	28	529	3.55	0.56
Nizuc 2	20	359	3.66	0.62
Nizuc 3	30	512	3.97	0.63
Playa 1	28	626	3.85	0.59
Playa 2	34	446	4.23	0.69
Playa 3	32	503	4.15	0.66
Nizuc 1	28	529	3.55	0.56
Akumal 1	28	634	3.47	0.5
Akumal 2	25	717	3.52	0.5
Akumal 3	27	655	3.55	0.55
Akumal 4	29	949	3.91	0.6
Akumal 5	23	552	3.45	0.5
Akumal 6	23	654	3.62	0.6
Tulum 1	21	218	3.26	0.60
Tulum 2	17	414	3.37	0.56
Tulum 3	31	474	4.09	0.66
Tulum 4	18	522	3.53	0.56
Tulum 5	18	442	3.33	0.54
Tulum 6	30	623	4.07	0.63
Tulum 7	21	548	3.68	0.58

Diversidad Beta

La diversidad beta considera la magnitud de cambio en la composición de las comunidades o el grado de diferenciación entre comunidades, en relación con un gradiente ambiental complejo o a patrones ambientales, para el presente trabajo se realizaron pruebas de Bray

Curtis, la semejanza indicó que la comunidad de peces tiene similitud entre sitios de cada localidad, es decir las comunidades de peces son diferentes en cada localidad (Figura 20).

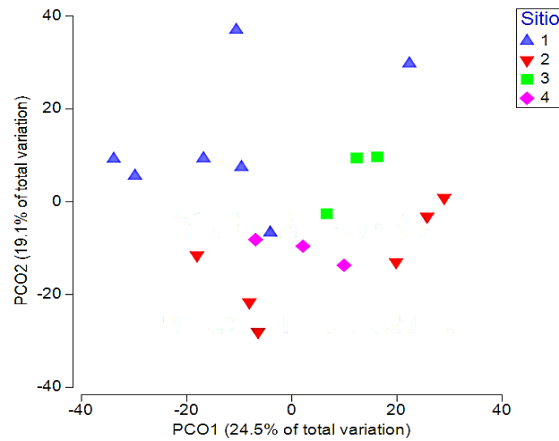


Figura 20. Análisis de componentes principales (PCO) con similitud de BrayCurtis de abundancias de peces para la zona centro y norte de Quintana Roo. Triángulos azules=Tulum, triángulos rojos invertidos=Akumal, cuadro verde=Playa del Carmen y rombo morado=Punta Nizuc.

PERMADISP y PERMANOVA de la comunidad de peces

La prueba PERMADIPS para analizar la dispersión de los datos se realizó en el programa PRIMER + PERMANOVA V7, Para aprobar la hipótesis nula la p debe ser menor a 0.05 $p < 0.05$. Se debe tomar en cuenta que PERMADISP puede ser sensible a la normalidad de los datos y detectar diferencias que PERMANOVA no, sin embargo, estas dos pruebas multivariadas tienen por sí mismas la tendencia a detectar patrones en los datos, y puede que existan diferencias esperadas que PERMADISP no detecte y PERMANOVA sí.

La hipótesis nula es aceptada para peces, es decir que la dispersión de la comunidad de peces en el norte del Estado Quintana Roo es homogénea, ya que se obtuvo $F=3.1$, $p=0.05$, $df_1=3$, $df_2=15$. Este patrón se puede observar en análisis de escalamiento multidimensional nMDS, ya que en la comunidad de peces se observan patrones de distribución a nivel localidad siendo Playa del Carmen el más claro, seguido de Tulum y Akumal, mientras que Punta Nizuc no es tan visible (Fig. 16).

Para el diseño de los factores se tomó como unidad de muestra los sitios y como factores las localidades. En total fueron 19 sitios muestreados en cuatro localidades (factores fijos: Tulum, Akumal, Playa del Carmen y Punta Nizuc) y tres zonas (sur y norte). Se utilizó la misma hipótesis con $p < 0.05$.

Según la hipótesis nula (Ho) los factores de localidad y localidad por zona fueron significativos $p < 0.05$ lo que indica que existen diferencias significativas en las muestras y la comunidad de peces es diferente a nivel localidad. El análisis de Monte Carlo se utiliza cuando hay poca variación en los factores esto indica que es aceptable hacer un muestreo pareado según la rutina de PERMANOVA. Al realizar una segunda prueba por pares resultó que de todas las combinaciones de localidad únicamente se encontraron diferencias significativas en Playa-Akumal lo que podría indicar que la comunidad de peces tiene un cambio en la composición de su abundancia (Tabla 21).

Tabla 14. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de peces del centro y norte de Quintana Roo.

Fuente	(df)	(ss)	(ms)	Pseudo f	P (perm)	Monte Carlo (MC)
Localidad	3	8492.5	2830.8	2.90	0.0001	0.003
Zona	1	1211.1	1211.1	1.24	0.2569	0.2739
Loc x zona	1	2329.7	2329.7	2.3917	0.0273	0.0431
Res	13	12663	974.08			
Total	18	24419				

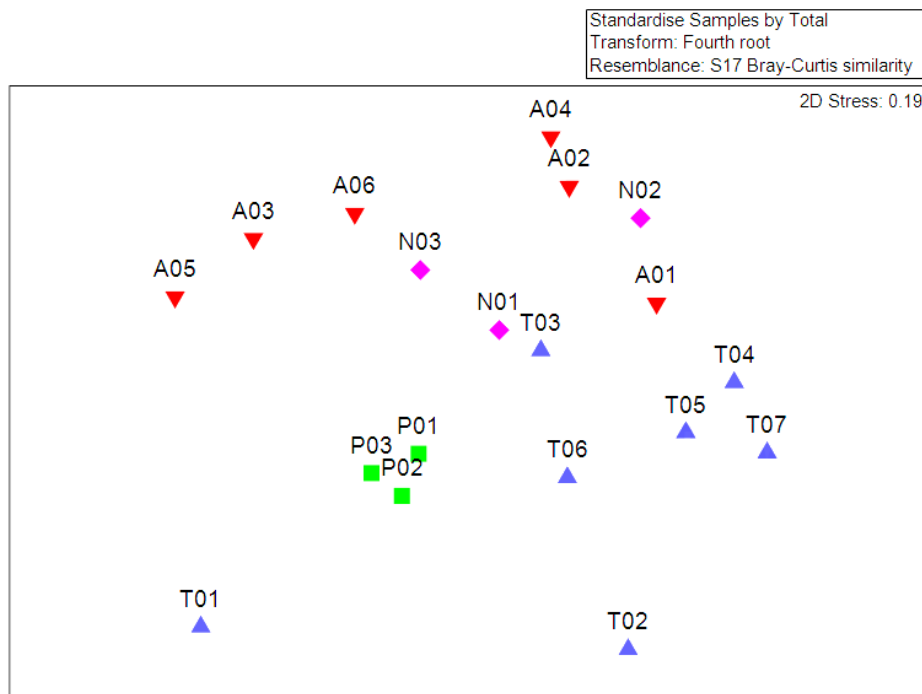


Figura 21. Análisis de escalamiento multidimensional (nMDS) no métrico por similitud de Bray Curtis de la comunidad de peces.

Análisis de componentes principales CANOCO de la comunidad de peces

El análisis de correspondencia de la comunidad de peces con las especies dominantes obtenidas en la prueba de asociación de Olmsted y Tukey, se observa que hay una clara diferenciación por localidad ya que como se ha mencionado anteriormente el CAP puede predecir la dispersión de variables al ser un ordenamiento como nMDS o PCA, y tener como dirección predictiva una variable. Todos los nutrientes fueron significativos y los ejes en CAP representan el 76.12% de la varianza total. Los nutrientes con mayor correspondencia son de manera positiva el amonio y el fosfato en la localidad de Akumal, y los nitritos de manera negativa, ya que, sus concentraciones son muy bajas. La abundancia de las especies mayormente afectadas por el amonio son *H. garnoti* ($r = 0.91$) y *H. flavolineatum* ($r = 0.54$) considerando que se encuentran muy alejadas del origen del eje. De manera negativa las especies más afectadas son *M. chrysurus* ($r = -0.65$) y *H. carbonarium* ($r = -1$) por el nitrito y la especie *A. chirurgus* ($r = -0.69$) por la clorofila. Los nitratos y los fosfatos no tuvieron una relación con la abundancia de peces dominantes del norte de Quintana Roo (Figura 22).

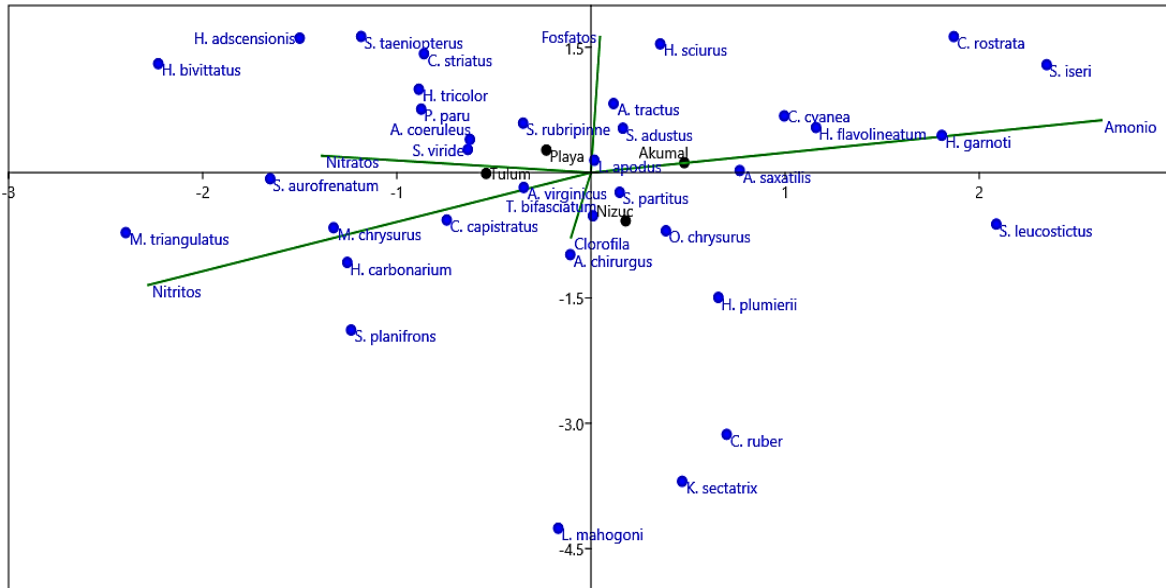


Figura 22. Análisis de correspondencias canónicas (CCA) con las especies dominantes para el grupo de los peces y los nutrientes.

Moluscos del centro y norte de Quintana Roo

En total se identificaron 557 individuos pertenecientes a cuatro clases, 15 órdenes, 32 familias, 47 géneros y 66 especies (Anexo 7 y Tabla 15). Las especies más abundantes fueron *Cerithium atratum* con 66 individuos, seguida de *Cerithium litteratum* y *Thylacodes decussatus*, ambos con 65 individuos. La especie *Arca imbricata* con 63 individuos se presentó como bancos de conchas muertas sobre manchones de arena. Se encontraron pocas especies dominantes y muchas especies únicas y raras, 25 especies únicas y 10 raras siendo en conjunto más de la mitad del total de las especies. Lo cual se ajusta a una comunidad de moluscos estable por tener pocas especies dominantes y muchas especies raras, esto confirmado con los valores de diversidad y equitatividad. Únicamente se registraron dos especies comunes o frecuentes en todas las localidades: *Aliger gigas* y *Ctenoides scaber* pudiéndose deber a la biología del grupo de tener menos movilidad que los peces y su forma de vida bentónica.

Tabla 15 . Abundancia de moluscos por localidad en la zona centro y norte de Quintana Roo, según la clasificación de Bouchet y Rocroi 2004 y 2008. Tulum (T), Akumal (A). Playa del Carmen (P) y Punta Nizuc (N).

Especie	Familias	T	A	P	N
<i>Fissurella fascicularis</i> Lamarck, 1822	Fissurellidae	2	0	0	0
<i>Fissurella rosea</i> (Gmelin, 1791)	Fissurellidae	2	1	0	1
<i>Fissurella nodosa</i> (Born, 1778)	Fissurellidae	1	1	0	0
<i>Fissurella sp</i>	Fissurellidae	0	1	0	0
<i>Diodora cayenensis</i> (Lamarck, 1822)	Fissurellidae	0	1	0	0
<i>Diodora listeri</i> (d'Orbigny, 1847)	Fissurellidae	0	0	1	0
<i>Cittarium pica</i> (Linnaeus, 1758)	Tegulidae	0	1	0	0
<i>Tegula fasciata</i> (Born, 1778)	Tegulidae	0	15	0	0
<i>Lithopoma phoebium</i> (Röding, 1798)	Turbinidae	3	0	0	2
<i>Lithopoma tectum</i> (Lightfoot, 1786)	Turbinidae	11	24	0	12
<i>Lithopoma caelatum</i> (Gmelin, 1791)	Turbinidae	5	3	0	0
<i>Lithopoma americanum</i> (Gmelin, 1791)	Turbinidae	21	4	2	0
<i>Thylacodes decussatus</i> (Gmelin, 1791)	Vermetidae	48	0	0	17
<i>Luria cinerea</i> (Gmelin, 1791)	Cypraeidae	1	4	0	0
<i>Macrocyprea zebra</i> (Linnaeus, 1758)	Cypraeidae	0	2	0	0

Continuación

<i>Macrocypraea cervus</i> (Linnaeus, 1771)	Cypraeidae	0	0	0	7
<i>Bursa corrugata</i> (Perry, 1811)	Cypraeidae	0	1	0	0
<i>Cyphoma gibbosum</i> (Linnaeus, 1758)	Ovulidae	1	0	2	0
<i>Aliger gigas</i> (Linnaeus, 1758)	Strombidae	2	8	1	7
<i>Cassis flammea</i> (Linnaeus, 1758)	Cassidae	0	2	0	3
<i>Linatella caudata</i> (Gmelin, 1791)	Cymatiidae	3	0	0	0
<i>Polinices lacteus</i> (Guilding, 1834)	Naticidae	1	0	3	0
<i>Poliniceus hepaticus</i> (Röding, 1798)	Naticidae	0	0	4	1
<i>Cerithium litteratum</i> (Born, 1778)	Cerithidae	48	0	0	17
<i>Cerithium eburneum</i> Bruguière, 1792	Cerithidae	0	0	0	2
<i>Cerithium muscarum</i> Say, 1832	Cerithidae	0	0	0	1
<i>Cerithium atratum</i> (Born, 1778)	Cerithidae	0	0	0	66
<i>Fasciolaria tulipa</i> (Linnaeus, 1758)	Fasciolariidae	1	4	1	0
<i>Coralliophila erosa</i> (Röding, 1798)	Muricidae	2	0	0	0
<i>Murex sp</i>	Muricidae	0	0	1	0
<i>Stramonita rustica</i> (Lamarck, 1822)	Muricidae	0	1	0	0
<i>Americoliva sayana</i> (Ravenel, 1834)	Olividae	0	0	0	2
<i>Chiton sp 1, 2</i>	Chitonidae	3	0	0	0
<i>Barbatia candida</i> (Helbling, 1779)	Arcidae	4	0	0	0
<i>Barbatia domingensis</i> (Lamarck, 1819)	Arcidae	0	1	0	2
<i>Arca zebra</i> Swainson, 1833	Arcidae	0	0	1	0
<i>Arca imbricata</i> Bruguière, 1789	Arcidae	0	4	63	5
<i>Tucetona pectinata</i> (Gmelin, 1791)	Glycymerididae	0	0	50	0
<i>Lithopaga antillarum</i> (d'Orbigny, 1853)	Mytilidae	0	0	2	0
<i>Modiolus squamosus</i> Beuperthuy, 1967	Mytilidae	0	0	0	1
<i>Isognomon radiatus</i> (Anton, 1838)	Isognomon	0	0	1	0
<i>Dendostrea frons</i> (Linnaeus, 1758)	Ostreidae	2	0	0	1
<i>Lima caribaea</i> d'Orbigny, 1853	Limidae	0	1	0	0
<i>Lima lima</i> (Linnaeus, 1758)	Limidae	0	1	1	0
<i>Limaria pellucida</i> (C. B. Adams, 1848)	Limidae	1	0	0	0
<i>Ctenoides scaber</i> (Born, 1778)	Ctenoides	2	1	0	0
<i>Anomia simplex</i> d'Orbigny, 1853	Anomidae	3	4	18	1
<i>Caribachlamys ornata</i> (Lamarck, 1819)	Pectinidae	0	0	3	0

Continuación

<i>Caribachlamys sentis</i> (Reeve, 1853)	Pectinidae	1	0	0	0
<i>Argopecten gibbus</i> (Linnaeus, 1758)	Pectinidae	1	0	0	0
<i>Ctena orbiculata</i> (Montagu, 1808)	Lucinidae	0	1	0	0
<i>Callucina keenae</i> (Chavan, 1971)	Lucinidae	0	0	0	2
<i>Codakia orbicularis</i> (Linnaeus, 1758)	Lucinidae	0	1	0	0
<i>Clathrolucina costata</i> (d'Orbigny, 1845)	Lucinidae	0	5	0	2
<i>Chama macerophylla</i> Gmelin, 1791	Chamidae	0	1	0	0
<i>Chama sinuosa</i> Broderip, 1835	Chamidae	1	0	0	0
<i>Chione cancellata</i> (Linnaeus, 1767)	Veneridae	2	0	0	1
<i>Transennella stimpsoni</i> Dall, 1902	Veneridae	0	0	1	0
<i>Dallocardia muricata</i> (Linnaeus, 1758)	Cardiidae	0	0	1	0
<i>Papyridea soleniformis</i> (Bruguière, 1789)	Cardiidae	0	0	1	0
<i>Ameritella sybaritica</i> (Dall, 1881)	Cardiidae	0	0	0	1
<i>Semele proficua</i> (Pulteney, 1799)	Semelidae	0	0	1	0
<i>Arcopagia fausta</i> (Pulteney, 1799)	Tellinidae	0	24	13	2
<i>Tellinella listeri</i> (Röding, 1798)	Tellinidae	0	0	0	1
<i>Octopus sp</i>	Octopodidae	2	0	0	0

Acumulación de especies de moluscos

Para los moluscos la riqueza observada fue de 66 especies a nivel regional, el análisis muestra que lo observaron aún requiere esfuerzo adicional para llegar al valor esperado. Se debe considerar que a la lista no se agregó las especies de micromoluscos. Las estimaciones de Chao 1 y 2 así como Jackknife 1 consideran alrededor de 100 especies. La estimación de Bootstrap fue la más cercana a lo registrado con 75 especies, algunos nudibranchios no fueron contabilizados, micromoluscos y algunas especies de quitones por lo que si se incorporan podría llegarse a la riqueza observada por Jackknife 2 (Figura 23).

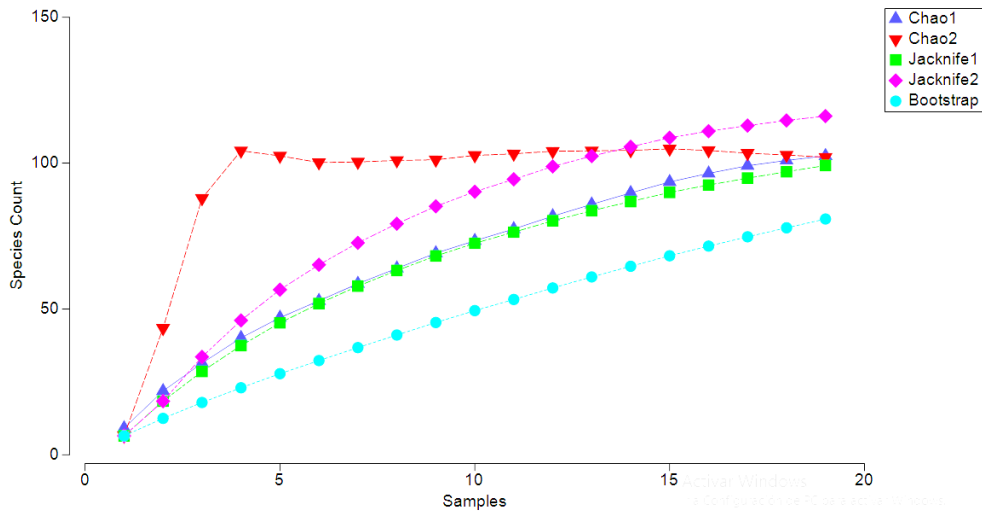


Figura 23. Curvas de rarefacción con la riqueza de especies de moluscos para la zona centro y norte de Quintana Roo.

Distribución de los moluscos

La localidad con mayor abundancia de individuos fue Punta Nizuc, y también es la que tiene menor riqueza de especies. Se registraron muchas especies dominantes, particularmente en pastos marinos y en pedacera de coral. La localidad con menor abundancia de individuos fue Tulum, y tuvo la mayor riqueza con 28 especies.

En Punta Nizuc se registraron 282 individuos, pertenecientes a 17 familias, 19 géneros y 23 especies. La familia con mayor número de especies fue Cerithiidae con cuatro especies seguidas de Tegulidae, Arcidae y Veneridae con dos especies, el resto de las familias únicamente tuvieron una especie. La especie más abundante fue *Cerithium atratum* con 66 esto debido a que en el transecto se encontró una pradera de *Thalassia* con numerosos conjuntos de organismos. La segunda especie más abundante fue *Cerithium literatum* con 85 individuos, fue la especie dentro de la familia Cerithiidae más fácil identificable por sus características ornamentaciones. El resto de las especies tuvieron poca abundancia.

En Playa del Carmen se registraron 115 individuos pertenecientes a 18 familias, 19 géneros y 22 especies. Las familias con mayor número de especies fueron Arcidae con tres especies, Limidae y Naticidae con dos especies y el resto de las familias sólo una especie. La especie más abundante fue *Arca imbricata* con 63 individuos, ya que se presentó como bancos de varios organismos en zonas donde predomina el sustrato de arena. La segunda especie más abundante fue otro bivalvo *Semele proficua* con 13 individuos, el resto de las especies tuvieron abundancias bajas de menos de cuatro individuos.

Para los moluscos, en Akumal se identificaron 124 individuos correspondientes a cuatro clases, 17 Familias, 24 géneros y 27 especies de moluscos. Los gasterópodos de Fissurellidae, y los bivalvos de las familias Limnidae y Lucinidae fueron las familias con mayor número de especies con cuatro cada uno; las familias Cypraeidae y Arcidae tuvieron dos especies cada uno, y el resto de las familias solo una especie. Las especies más abundantes fueron *Lithopoma tecta americana* y *Tegula fasciata* con 28 y 26 individuos cada una; seguidas de *Semele proficua* y *Lobatus gigas* con 15 y ocho individuos, el resto de las especies tuvieron menos de cinco registros.

En la localidad de Tulum se registraron 109 individuos de moluscos correspondientes a cuatro clases; 19 Familias, 23 géneros y 28 especies para macromoluscos (Figura 24). La familia con mayor número de especies fue Turbinedae y Limnidae con cuatro y tres especies. Otras familias tuvieron dos o menos especies. Las especies más abundantes fueron *Cerithium literatum* con 24 individuos y *Lithopoma tecta americana* con 21 individuos, otras especies tuvieron abundancias menores a 11.

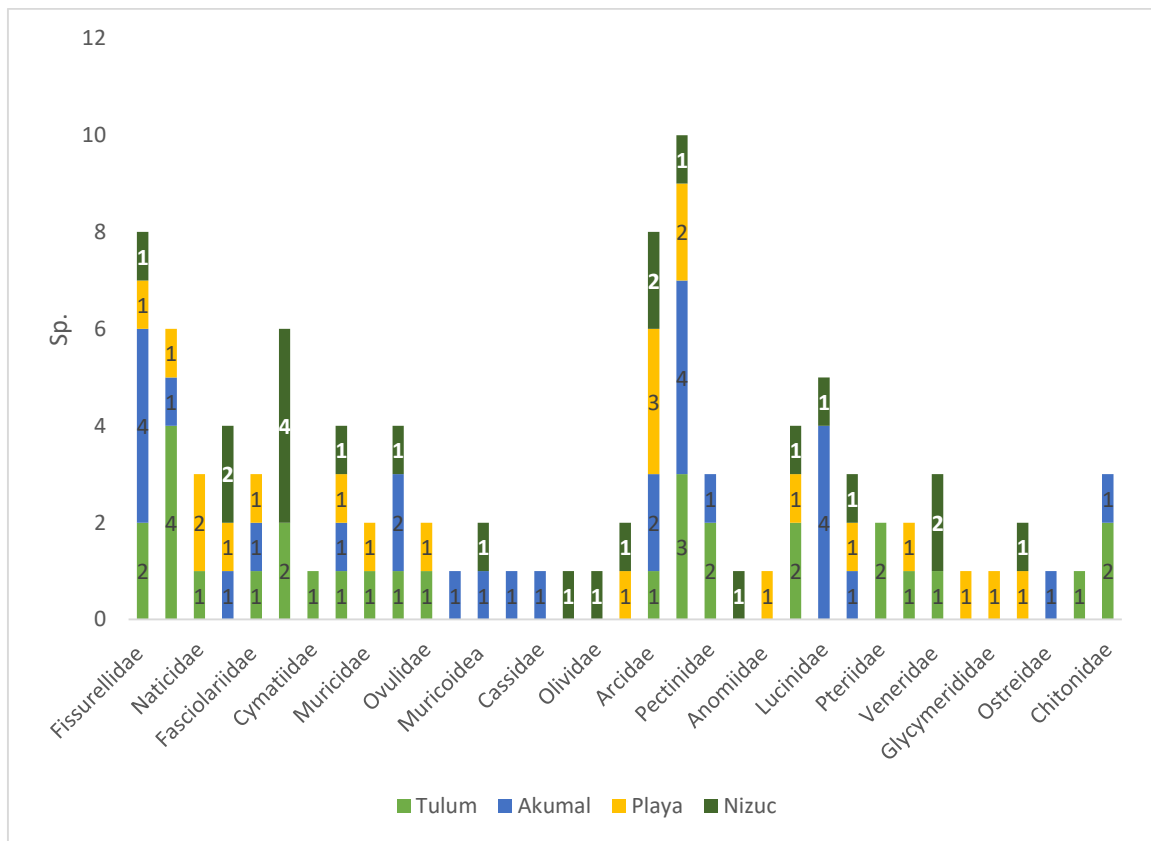


Figura 24. Número de especies por familia de moluscos en las localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo.

Registros bibliográficos de moluscos para la zona de estudio, zona centro y norte de Quintana Roo.

Los estudios sobre la comunidad de moluscos son escasos, el resultado de la revisión determinó que 30 especies no tienen registro previo puntual en el Caribe mexicano, sin embargo, las bases de datos de ITIS, Malacolog, Sealife y Gbif presentan distribuciones en el Oeste del Atlántico, Quintana Roo, Caribe y Norteamérica, ninguna de estas bases de datos tiene datos puntuales, por lo que para este trabajo se consideran como datos no confirmados. La base de datos Naturalista que se apoya de observaciones, fotos y de expertos en los grupos de animales, registran de total de especies identificadas en este estudio 40 especies observadas. Tomando en cuenta lo anterior se puede considerar que el presente estudio registra 14 especies nuevas especies para el Caribe mexicano: *Diodora listeri*, *Thylacodes decussatus*, *Bursa corrugata*, *Linatella caudata*, *Poliniceus hepaticus*, *Coralliophila erosa*, *Americoliva sayana*, *Modiolus squamosus*, *Limaria pellucida*, *Clathrolucina costata*, *Transennella stimpsoni*, *Chama sinuosa*, *Papyridea soleniformis*, *Ameritella sybaritica* (Anexo 8).

Análisis de porcentaje de similitud de moluscos en las localidades del muestreo.

De acuerdo con el análisis SIMPER se identificaron las especies clave (entiéndase por las comunes y dominantes) para los grupos de moluscos en las localidades del norte de Quintana Roo, siendo las especies responsables de la mayor similitud *C. litteratum* (50.93%) para Tulum y Punta Nizuc, *L. gigas* (23.59 %) para Akumal y *S. proficua* (67.88 %) para Playa del Carmen. La especie *L. tectum* fue la única especie que se presentó como especie clave en tres localidades con un 47.59 % de contribución total. La localidad con menos especies clave fue Playa del Carmen y Tulum tuvo la mayor cantidad de especies clave (Tabla 16).

Tabla 16. Análisis SIMPER de las especies que contribuyen con más de un 70% a las diferencias por localidad de moluscos.

Especies	Porcentaje de abundancia	Porcentaje de similitud	Porcentaje de contribución	Porcentaje de contribución acumulado
Nizuc				
Especies clave				
<i>Cerithium litteratum</i>	1.66	4.81	24.42	24.42

Continuación

<i>Lithopoma tectum</i>	1.18	3.16	16.04	40.46
<i>Cerithium eborneum</i>	0.97	2.96	15.01	55.47
<i>Cerithium sp</i>	1.48	2.78	14.12	69.59
Playa				
Especies clave				
<i>Semele proficua</i>	1.74	6.38	67.88	67.88
<i>Polinices lacteus</i>	0.94	3.02	32.12	100
Akumal				
Especies clave				
<i>Lobatus gigas</i>	1.15	3.78	23.59	23.59
<i>Lithopoma tectum</i>	1.19	3.21	20	43.59
<i>Semele proficua</i>	1.12	2.78	17.34	60.93
<i>Tegula fasciata</i>	1.06	2.64	16.46	77.39
Tulum				
Especies clave				
<i>Cerithium litteratum</i>	0.87	2.14	26.51	26.51
<i>Lithopoma tectum</i>	0.71	0.93	11.55	38.06
<i>Chiton sp</i>	0.5	0.8	9.94	48
<i>Lithopoma tecta americana</i>	0.67	0.79	9.75	57.75
<i>Coralliophila abbreviata</i>	0.49	0.72	8.93	66.68
<i>Astralium phoebia</i>	0.49	0.72	8.88	75.56

Análisis de diversidad de moluscos

La diversidad de moluscos por sitios y localidades es diferente a la registrada para los peces, en las localidades de Tulum y Akumal presentaron diversidades 3.87 y 3.7 bits/ind, considerándose una diversidad alta, al ser mayores a 2.8 bits/ind. En contraste, Playa del Carmen y Punta Nizuc presentan diversidades bajas menores a 2.8 bits/ind, con 2.54 y 2.25 bits/ind respectivamente. La diversidad de moluscos varía disminuyendo conforme se avanza al norte de Quintana Roo (Tabla 17). En cuanto a la equitatividad también varía del centro al norte de Quintana Roo de menor a mayor, diversidad alta con alta equitatividad

representan comunidades saludables ya que la mayoría de las especies están representadas con la misma abundancia y tienen pocas especies dominantes o con abundancias superiores a las demás especies. La equitatividad por debajo de 0.5 muestra que hay muchas especies dominantes y pocas especies con abundancias similares, mostrando una comunidad sin equilibrio.

Tabla 17. Valores de diversidad de moluscos por localidades en la zona centro y norte de Quintana Roo.

Localidades	Riqueza (número de especies)	Abundancia (número de individuos)	Shannon-Wiener H' bits/ind	Pielou J' H'max
Nizuc	23	282	2.25	0.40
Playa del Carmen	22	115	2.54	0.54
Akumal	27	124	3.70	0.77
Tulum	28	109	3.87	0.83

En el estadístico de t de Hutchenson para comparar la diversidad de moluscos entre localidades, donde si Tt (T tabla) es mayor que p (valor de significancia) no hay diferencias entre las diversidades. Se observó que únicamente entre Playa del Carmen y Punta Nizuc, existen diferencias significativas entre sus diversidades según la abundancia y la riqueza de especies (Tabla 18).

Tabla 18. Análisis comparativo de t de Hutchenson con los valores de diversidad de Shannon-Wiener (bits/ind) de moluscos entre localidades de la zona centro y norte de Quintana Roo. Tt (T calculada), Tc (grados de libertad) y p (valor de significancia).

Moluscos						
Localidades	Tulum		Akumal		Playa	
	Tt	p	Tt	p	Tt	p
Nizuc	0.88	0.38	0.2	0.84	3.77	0.001
Playa	5.01	0.001	4.42	0.001		
Akumal	0.81	0.42				

Diversidad taxonómica de moluscos

Para moluscos se obtuvo un valor de diversidad taxonómica (Δ) de 68.617 y de distinción taxonómica total (TTD) de 108.9, al igual que peces con un valor de $p < 0.05$. De manera general todas las localidades presentaron poca diversidad taxonómica (Δ), hay que considerar que a nivel regional también presenta poca diversidad taxonómica (Δ). La localidad con mayor diversidad taxonómica de peces y moluscos fue Akumal, indicando que tiene una baja relación entre las especies, pero al tener mayor valor de Lambda presenta una sobreestimación de los taxa. Tulum es la segunda localidad con mayor diversidad y distinción taxonómica, tiene 18.797 (Δ) y 32.022 (Λ^+), seguida de Nizuc y Playa del Carmen (Tabla 19).

Tabla 19. Valores de los índices taxonómicos para la comunidad de moluscos por localidad.

Localidades	Diversidad taxonómica promedio (Δ)	Distintividad taxonómica (Δ^*)	Distinción taxonómica (Λ^+)	Variación de distinción (VarTD)
Nizuc	12.414	16.416	24.383	97.533
Playa	11.47	15.722	24.744	98.977
Akumal	21.744	29.122	36.782	147.13
Tulum	18.797	24.042	32.022	160.11

Diversidad de moluscos a escala espacial

Sólo los sitios de Akumal 1 y Nizuc 2 tuvieron diversidades altas de moluscos mayores a 2.8 bits/ind con equitatividad alta, por lo que se podrían considerar como en equilibrio o estables. El resto de los sitios tuvieron diversidades bajas, debido a que en algunos sitios se encontraron muy pocas especies, el sitio con la menor diversidad fue Akumal 6 con sólo dos especies, en algunos sitios se encontró hasta 18 especies Nizuc 2. La equitatividad fue muy variable ya que mientras algunas especies como los de la Familia Cerithiidae tenían hasta 66 ind, hubo muchas especies raras (Tabla 20).

Tabla 20. Diversidad espacial de moluscos por sitio para la zona centro y norte de Quintana Roo.

Sitio	Riqueza (número de especies)	Abundancia (número de individuos)	Shannon- Wiener H' bits/ind	Pielou J' H'max
Nizuc 1	18	39	3.99	1
Nizuc 2	13	89	1.83	0.4
Nizuc 3	5	14	1.43	0.5
Playa 1	7	11	2.40	1
Playa 2	8	17	2.44	0.86
Playa 3	11	85	1.33	0.29
Akumal 1	10	31	2.87	0.83
Akumal 2	6	13	2.31	0.9
Akumal 3	5	9	2.19	0.9
Akumal 4	8	25	2.65	0.82
Akumal 5	10	35	2.68	0.75
Akumal 6	2	4	0.81	0.58
Tulum 1	6	9	2.41	1
Tulum 2	4	29	2.21	0.65
Tulum 3	5	34	1.51	0.42
Tulum 4	5	14	1.93	0.73
Tulum 5	7	11	2.25	0.94
Tulum 6	7	10	2.31	1
Tulum 7	3	27	1.60	0.84

Diversidad Beta

Los moluscos no se agruparon a nivel de localidad, es decir hay sitios de diferentes localidades que tienen una alta similitud (Figura 25). La comunidad de moluscos tiene un mayor recambio de especies con diferentes abundancias, mientras que la comunidad de peces tiene un menor el recambio de especies.

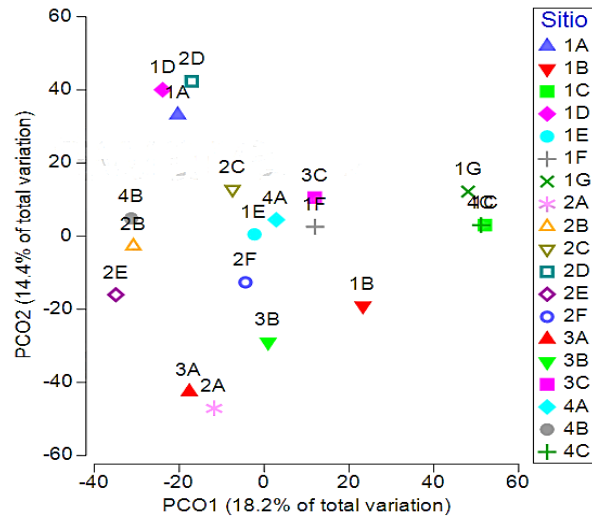


Figura 25. Análisis de componentes principales (PCO) con similitud de BrayCurtis con abundancias de moluscos del centro y norte de Quintana Roo. 1 (a, b, c, d, e, f, g)=Tulum, 2 (a, b, c, d, e, f)=Akumal, 3 (a, b, c)=Playa del Carmen y morado (a, b, c)=Punta Nizuc.

PERMADISP y PERMANOVA de la comunidad de moluscos

Para la comunidad de moluscos, la hipótesis nula de la rutina de PERMADISP es rechazada (Tabla 21), ya que $p > 0.05$, por lo tanto, la comunidad tiene una dispersión no homogénea. En moluscos se observa no tener patrones de distribución con respecto a la homogeneidad de los datos (Fig. 22).

Tabla 21. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMADISP para moluscos del centro y norte de Quintana Roo.

Factores	df1	df2	F	p
Moluscos	3	15	2.6	0.09

Para el caso de moluscos, PERMANOVA siguió con la misma hipótesis planteada en peces, se rechazó la hipótesis nula y por tal motivo, no se rechaza la hipótesis alternativa lo que indica que las localidades no hay diferencias según la abundancia de moluscos. Lo que se puede observar en la prueba de nMDS, en donde claramente no hay una relación entre las muestras de cada sitio (Figura 26). La prueba de Monte Carlo también muestra que no hay

diferencias significativas y al realizar un procedimiento pareado se confirma, al no haber ningún sitio con diferencias en sus abundancias (Tabla 22).

Tabla 22. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos del centro y norte de Quintana Roo.

Fuente	Grados de libertad (df)	Suma de cuadrados (ss)	Cuadrados mínimos (ms)	Pseudo f	P (perm)	Monte Carlo (MC)
Localidad	1	5722.1	5722.1	1.45	0.09	0.15
Res	15	58804	3920.2			
Total	18	73935				

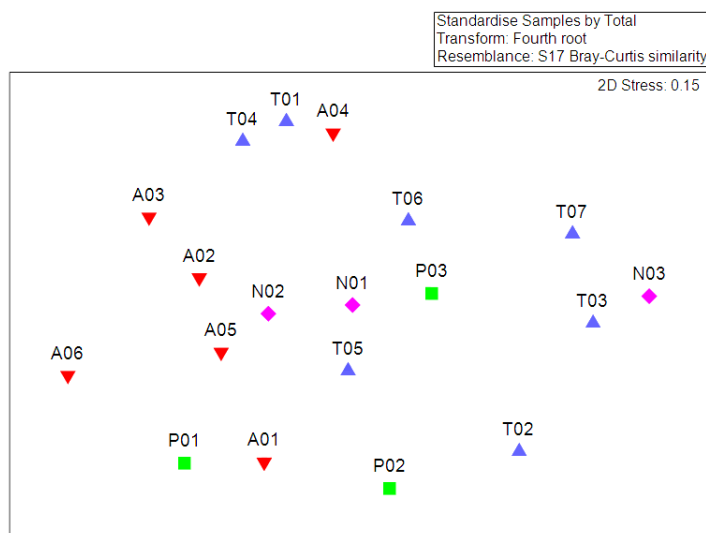


Figura 26. Análisis de escalamiento multidimensional (nMDS) no métrico por similitud de Bray Curtis de la comunidad de moluscos.

Análisis de componentes principales CANOCO de la comunidad de moluscos.

Los ejes representan el 68.26 % de la varianza total. El CAP para el grupo de moluscos dominantes presentó una relación entre los fosfatos, nitratos y clorofila con Playa de Carmen y con dos especies, *A. imbricata* ($r = 0.69$) y *C. scaber* ($r = 0.47$). Para la localidad de Akumal presenta una relación con el amonio, al igual que los peces; las especies de moluscos que se relacionan con este nutriente es *L. cinerea* ($r = -0.58$) y *F. tulipa* ($r = -0.84$). Tulum y Punta Nizuc tienen poca relación con los nitritos y las especies con mayor relación es *L. tecta americana* ($r = 0.38$) (Figura 27). Al igual que en los peces, en los moluscos se puede inferir que hay una diferenciación menor (tomado en cuenta la teoría de la

ordenación) en cuanto a las localidades ya que Tulum y Nizuc se encuentran cerca y se consideraría que presentan una mayor relación en sus comunidades y las condiciones de los nutrientes.

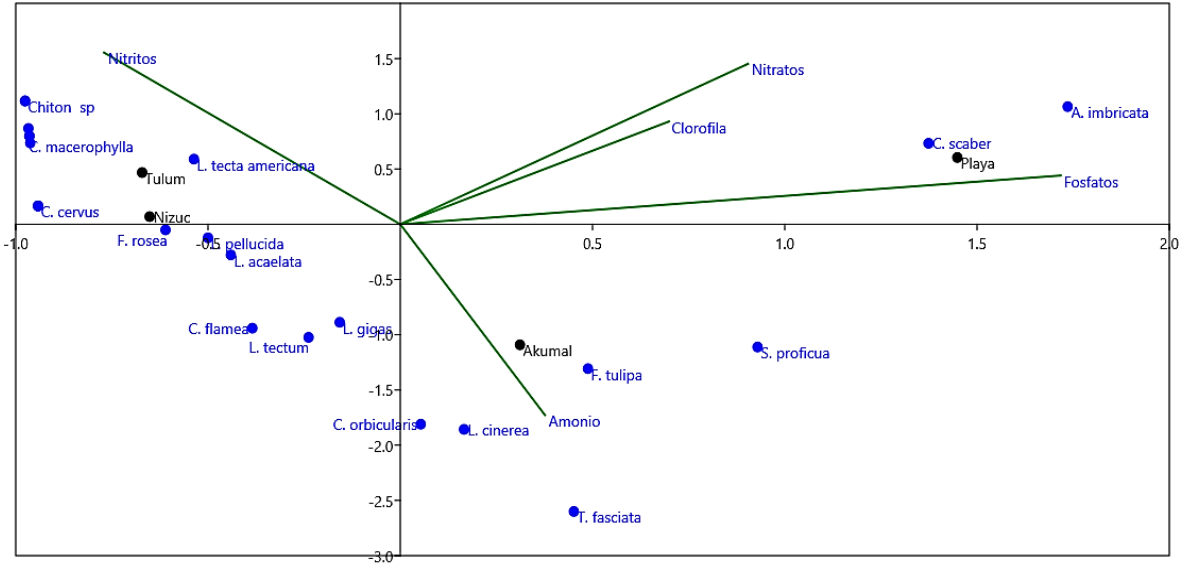


Figura 27. Análisis de correspondencias canónicas (CCA) con las especies dominantes del grupo de los moluscos y los nutrientes.

Peces y moluscos

Se encontró que la riqueza de especies a nivel local es mayor en peces que en moluscos, ya que la mayor riqueza de moluscos fue de 28 especies y 63 especies de peces en Tulum. Por lo tanto, hay más del doble de riqueza de peces que de moluscos. A nivel región, refiriéndose al centro y norte del Caribe mexicano, se observó que la riqueza de ambos taxa es parecida con 85 especies de peces y 66 de moluscos.

Siguiendo el mismo concepto de diseño de factores, se observó que para la unión de los filios de peces y moluscos no se rechaza la hipótesis nula, para el factor localidad hay diferencias en sus muestras. El test MC indica que hay diferencias entre factores, y al realizar un procedimiento con muestras pareadas se observó que Tulum-Akumal presenta diferencias significativas (Tabla 23).

Tabla 23. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos y peces del centro y norte de Quintana Roo.

Fuente	Grados de libertad (df)	Suma de cuadrados (ss)	Cuadrados mínimos (ms)	Pseudo f	P (perm)	Monte Carlo (MC)
Localidad	1	4104.6	4104.6	3.06	0.0002	0.0031
Res	15	20071	1338.1			
Total	18	29606				

Abundancia de fauna con nitratos y clorofila.

El análisis de componentes principales CANOCO, se utilizó para confirmar la relación de las variables ambientales con datos de las especies como abundancia o biomasa; en este estudio se utilizó para explorar los nutrientes que tienen mayor efecto sobre las muestras de cada filo. Se observó que de los nutrientes analizados el nitrato y la clorofila son los que tienen una mayor relación con las especies de la fauna, por lo que se tomó la decisión de realizar pruebas de PERMANOVA con estos dos nutrientes como factores dentro del diseño.

Para los peces resultó que en el factor localidad la hipótesis nula no se rechaza, por lo que las comunidades de peces con relación a los nitratos y clorofila son diferentes. Al realizar una prueba pareada el grupo de Akumal-Playa para nitratos tuvieron un valor menor a 0.05, mientras que para clorofila no se encontraron diferencias significativas por que se acepta la hipótesis alternativa (Tabla 24).

En el caso de los moluscos la hipótesis nula se rechaza por lo que se asume que todas las muestras presentan una homogeneidad y al realizar una prueba pareada se confirma que no hay pruebas necesarias para afirmar que en este estudio los nitratos o la clorofila influyen en la distribución de la abundancia para el norte de Quintana Roo (Tabla 25).

Tabla 24. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de peces y nitratos y clorofila como factores en centro y norte de Quintana Roo.

Fuente	Grados de libertad (df)	Suma de cuadrados (ss)	Cuadrados mínimos (ms)	Pseudo f	P (perm)	Monte Carlo (MC)
Peces						
Localidad	3	7275.6	2425.2	2.35	0.0012	0.0069
Nitratos	1	1419.9	1419.9	1.38	0.2127	0.231
Lo * ni	2	2518.8	1259.4	1.2	0.2519	0.2762
Residuales	12	12346	1028.8			
Total	18	24419				
Clorofila						
Localidad	3	6858	2286	2.203	0.009	0.0083
Nitratos	1	886.17	886.17	0.854	0.5613	0.5221
Lo * cl	2	2878.8	1439.4	1.387	0.153	0.1919
Residuales	12	126451	1037.6			
Total	18	24419				

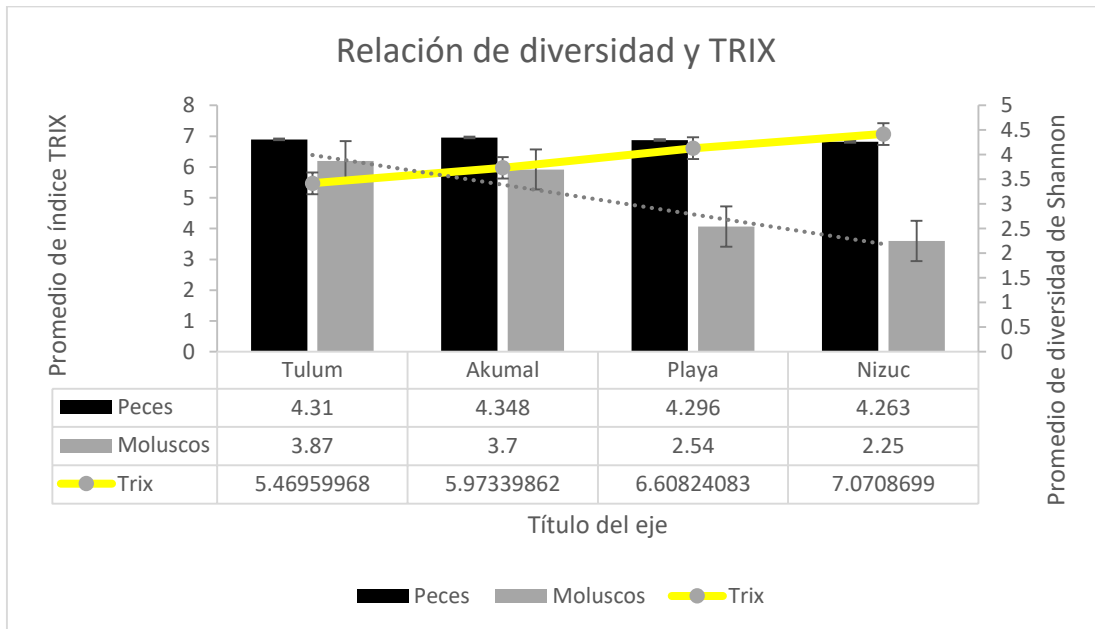
Tabla 25. Valores de los grados de libertad, F y pseudo p de PERMANOVA para la comunidad de moluscos y nitratos y clorofila como factores en centro y norte de Quintana Roo.

Fuente	Grados de libertad (df)	Suma de cuadrados (ss)	Cuadrados mínimos (ms)	Pseudo f	P (perm)	Monte Carlo (MC)
Moluscos						
Localidad	3	13109	4369.8	1.08	0.33	0.36
Nitratos	1	6054.7	6054.7	1.49	0.12	0.17
Lo * ni	2	4579.9	2290	0.56	0.96	0.90
Residuales	12	48510	4042.5			
Total	18	73935				
Clorofila						
Localidad	3	15105	5035	1.26	0.17	0.21
Nitratos	1	3370.5	3370.5	0.84	0.59	0.54
Lo * cl	2	8097	4048.5	1.02	0.47	0.42
Residuales	12	47615	3967.9			
Total	18	73935				

Relación de diversidad de la fauna de peces y moluscos con la calidad del agua

Se observó que a la diversidad de peces no les afectó la calidad del agua ya que su diversidad presentó valores constantes y no hubo una variación latitudinal como se esperaba (Figura 28). Sin embargo, se puede observar una relación directa de peces herbívoros con las comunidades de macroalgas, en la localidad de Tulum se observa la mayor abundancia de peces herbívoros y disminuye hacia el norte, es decir, hacia Punta Nizuc, la cobertura de macroalgas aumenta en la misma dirección de Tulum hacia Punta Nizuc, es decir, a mayor abundancia de peces herbívoros menor cobertura de macroalgas y a menor abundancia de peces menor cobertura de macroalgas (Figura 29). Se observó también que tiene una relación media con una $r = -0.3$ *u* que representa una asociación media (Figura 30).

Para moluscos se encontró una relación inversa entre la calidad del agua y la diversidad, ya que en las localidades donde se registraron niveles de TRIX altos se encontró menor diversidad de moluscos, así como una mayor densidad poblacional y mayores volúmenes de descargas. Los moluscos al ser bentónicos y tener movimiento limitado pueden ser más sensibles a los cambios ambientales.



Menos cifras significativas en Trix

Figura 28. Gráfica apilada de diversidad de fauna y calidad del agua.

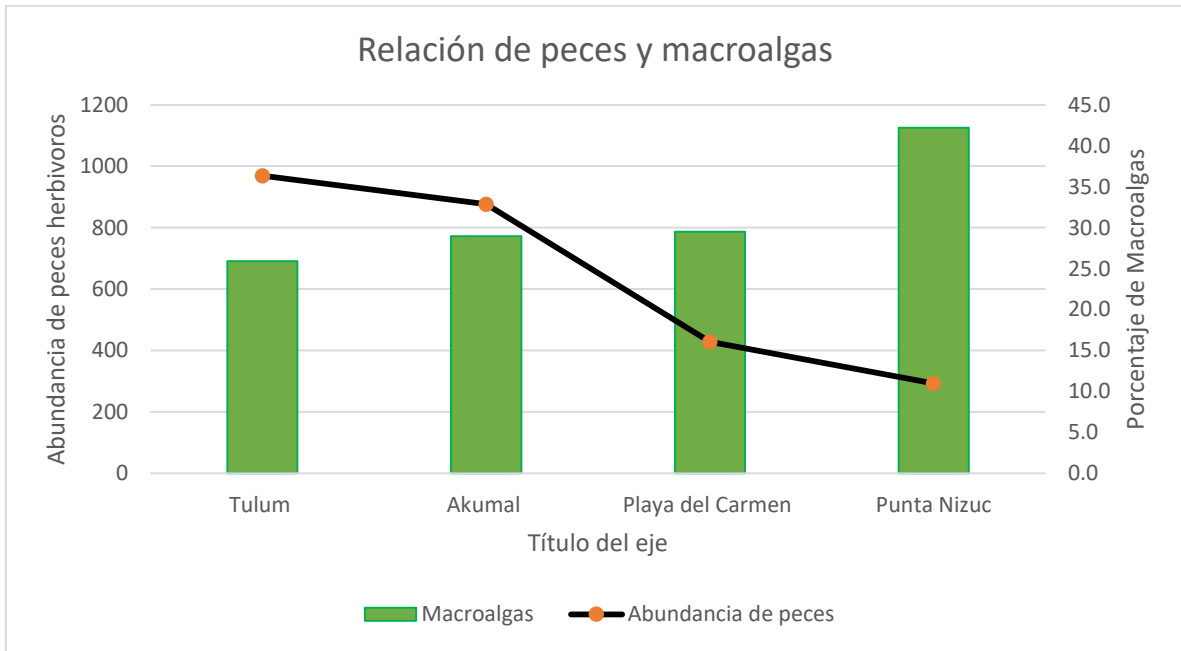


Figura 29. Relación entre la abundancia de peces herbívoros y el porcentaje de la cobertura de macroalgas.

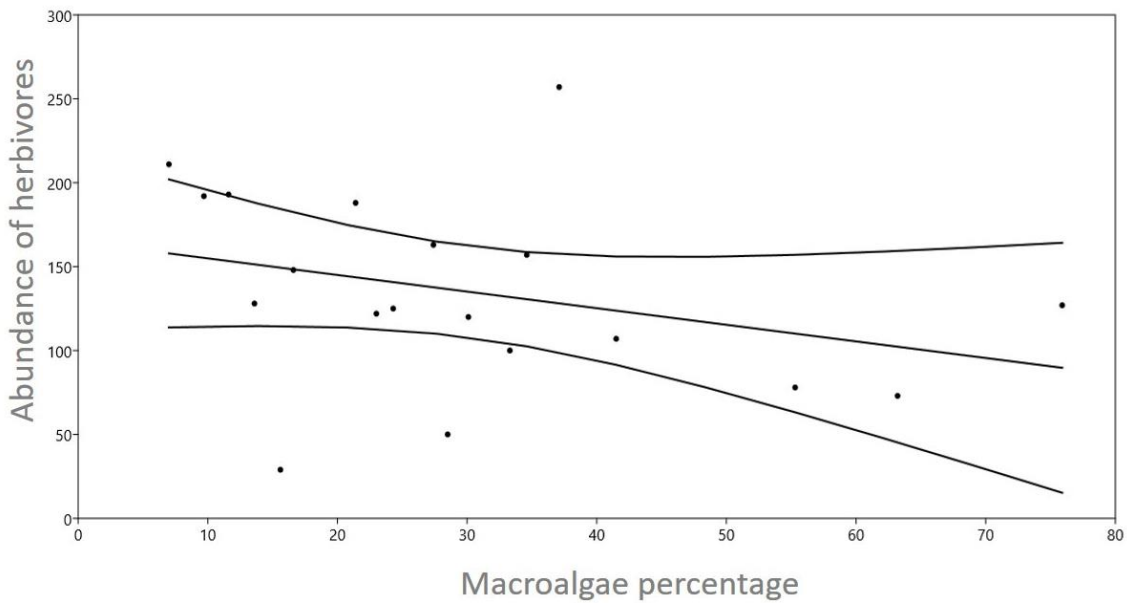


Figura 30. Regresión lineal de herbívoros y cobertura de macroalgas en el centro y norte de Quintana Roo. $r = -0.3$

Discusión

Calidad del Agua

Como se observó en los resultados que hay sitios con valores altos de clorofila *a*, tal es el caso de Playa del Carmen con valor de 40.89 mg/m³. Signoret *et al.*, (1998) reporta valores menores a 1 mg/m³ para el Mar Caribe particularmente el estado de Quintana Roo; también indica que está condición de poca concentración de clorofila es común de Caribe. Para este trabajo seis de los sitios tuvieron valores mayores a 1 mg/m³, considerando el trabajo Pérez-Santos *et al.*, (2014) que considera alto a valores mayores a 1.5 mg/m³; en otro trabajo caracterizan la surgencia del sur de Caribe reportando valores máximos 1.65 mg/m³ (Rueda-Roa y Muller-Karger, 2013), los valores reportados en este trabajo indica que hay una alta concentración de clorofila *a* en el norte del Caribe mexicano.

Se puede observar claramente que los valores obtenidos en este trabajo son mayores a las concentraciones del Mar Caribe; sin embargo, y a pesar de que los valores fueron altos en algunos sitios se necesita un mayor esfuerzo de muestreo, particularmente en temporalidad ya que el aumento de la concentración puede estar sujeto a diversos factores, un ejemplo es la surgencia de Yucatán o el aumento de temperatura del mar. Según la CONABIO en los reportes de concentración de clorofila *a* en el 2013, se observa que en el norte de Quintana Roo, desde Playa del Carmen hasta las costas de Yucatán, hay un aumento de la concentración que va desde 1 mg/m³ hasta los 40 mg/m³ de clorofila *a* respectivamente, que podría estar relacionado con el aporte de la Laguna Nichupté. Así mismo en el centro de Quintana Roo, aumenta la concentración desde Tulum hacia la reserva de Sian Ka' an, desde 1 mg/m³ hasta los 40 mg/m³. Es decir, la concentración de clorofila medida en este trabajo está en el rango reportado por la CONABIO, y si bien es una medición momentánea, es un antecedente de las altas concentraciones en Playa del Carmen y Punta Nizuc.

Se ha mencionado en este trabajo que la clorofila *a* tuvo valores altos, particularmente en Punta Nizuc, el mínimo fue de 6.4 mg/m³ y el máximo de 25.9281 mg/m³, como referente a que esta concentración es alta Herrera-Silviera *et al.*, (2015) reporta a través de un monitoreo de 2008 al 2014 valor que no rebasan los 0.4 mg/m³ con el mismo método analítico. La CONABIO por mapas satelitales reporta que la concentración clorofila *a* en Punta Nizuc en el 2013 tiene un valor máximo de 5 mg/m³ hasta 40 mg/m³.

No hay normativa que determine límites respecto a la clorofila *a*, en el reporte de SEMARNAT, (2016) indica que las concentraciones de clorofila *a* en el norte de Quintana

Roo no aumentan a lo largo del tiempo, pero las concentraciones se ven influenciadas por los efectos de eventos como los huracanes y el aporte de nutrientes vía descargas de la Laguna Nichupté o filtraciones de la infraestructura turística, por lo que podría ser un buen indicador de la respuesta a los aportes de nutrientes y de los síntomas de eutrofización. En el reporte de Salazar-Vallejo (2002), la productividad de microalgas fotosintéticas aumenta al doble unos días después de un huracán y hasta por cinco meses y por deducción hay un aumento de clorofila *a*.

Según Delgado y colaboradores (2019), los factores que afectan la distribución de concentración de clorofila *a* en el Mar Caribe son los afluentes de estuarios, la profundidad de la nutriclina, dirección del viento y estratificación térmica. Aranda (2004), indica que el aumento de la clorofila *a* en Yucatán es debido al aporte de nutrientes de la masa continental. En conclusión existen varios factores que explican las altas concentraciones de clorofila *a* en este trabajo, las cuales no se evaluaron y resulta importante realizar más estudios.

El nitrato tiene una relevancia particular para las comunidades costeras dada la revisión de los trabajos en el estado de Quintana Roo y a nivel mundial. Las localidades con mayor concentraciones promedio de nitrato fueron Tulum y Punta Nizuc, de estas localidades Punta Nizuc tiene el mayor porcentaje de macroalgas carnosas; y autores como Garza-Pérez *et al.*, (2010) y Graham *et al.*, (2017) indican que el aumento en las coberturas de macroalgas carnosas es debido al aumento de los nutrientes, particularmente el nitrato y que a su vez se relaciona con la herbívora principalmente de peces. En este sentido la teoría nos dice que altas concentraciones de nitrato impulsan la productividad primaria, lo que a su vez aumenta la abundancia total de invertebrados y, por lo tanto, la riqueza total del sitio (Graham *et al.*, 2017). Está condición solo se cumple en el norte del Caribe mexicano, particularmente en sitios de Playa del Carmen y Punta Nizuc en donde existen concentraciones mayores de nitrato que sitios de Tulum y Akumal, y en el norte se registró la mayor riqueza y abundancia de moluscos y una baja de peces herbívoros como peces loro y cirujanos. Caso contrario Tulum 7 que es un sitio que tiene una concentración alta de nitratos y poca riqueza de especies, está condición es explicada por Graham *et al.*, (2017), ya que indica que existen otros factores que limitan la riqueza local entre las que destacan la luz y la temperatura, también agrega que es común encontrar localidades con altas concentraciones de nitrato y pocas especies en sitios con aporte de contaminantes continentales y que se necesitan más estudios puntuales.

En el caso puntual de Akumal existen antecedentes con una concentración mayor a la presentada en este trabajo. Mientras que este trabajo reporta un promedio de $7.30 \text{ N-NO}_3^- \mu\text{mol/L}$ (Anexo 2), Mata-Lara, (2012) reporta $67.2 \text{ N-NO}_3^- \mu\text{mol/L}$, y Hernández-Terrones *et al.*, (2015) reporta un valor máximo de $51.8 \text{ N-NO}_3^- \mu\text{mol/L}$ y mínimo de $2.6 \text{ N-NO}_3^- \mu\text{mol/L}$ en sus 18 estaciones (Tabla 4). Este último trabajo indica que los ecosistemas costeros de Akumal se ven afectados por fuentes antropogénicas de nutrientes, que incluyen tanques sépticos en mal estado, derrames de aguas residuales no tratadas e inyección de éstas al acuífero. El aumento de la contaminación de las aguas subterráneas aumentará la presión sobre los recursos hídricos y especialmente sobre el arrecife adyacente. Por lo tanto, se debe considerar que si aumenta la concentración de nitratos y clorofila en Akumal también aumentará la riqueza y abundancia de invertebrados, lo que podría verse reflejado en un cambio en el ecosistema.

En Punta Nizuc se obtuvo el valor más alto de concentración de nitrato por sitio, y el mayor porcentaje promedio de algas carnosas. Las condiciones del nutriente varían conforme a las condiciones climáticas y no hay una tendencia, como se observa en el trabajo de Herrera-Silveira *et al.*, 2014, que reporta que hay sitios en el Parque Nacional Costa Occidental Punta Cancún, Punta Nizuc e Isla Mujeres que mantienen mejor las condiciones al paso del tiempo, es decir, que tienen una mayor resiliencia a las concentraciones de nitrato debido a su relación con estuarios, por lo tanto, hay sitios que al tener mayor influencia de estuarios tienen un aporte constante de nutrientes y no permite la dilución en la columna de agua como lo son los sitios en Punta Nizuc y la influencia de la Laguna Nichupté .

En este trabajo se discuten dos localidades, Punta Nizuc y Playa del Carmen en donde se encontró que hay factores como la población adyacente y las descargas de agua ilegal, que podrían provocar un aumento de la descarga de nutrientes, particularmente el nitrato como lo mencionan Aranda (2004), Graham *et al.*, (2007) y Herrera-Silveira *et al.*, (2015). Por lo que se puede inferir que a lo largo de la costa las condiciones son cambiantes y hay puntos en donde los impactos pueden ser mayores, en esa misma dirección se podría trabajar en una metodología para valorar los puntos vulnerables y su conexión con el arrecife.

En la literatura se reporta que el nitrato ha ido en aumento desde hace 20 años como se menciona en los trabajos de Mata-Lara (2012), Baker y colaboradores (2013) y Hernández-Terrones y colaboradores (2015) y que pueden estar relacionado con el aumento del turismo, también este aumento puede estar provocando un cambio de estado trófico, sin

embargo, no hay evidencia concreta que lo avale. En el caso particular de las zonas del Caribe mexicano, hay pocos estudios en la zona sur, sin embargo, los pocos que hay reportan que las condiciones del nutriente indica que el sur tiene concentraciones bajas de nitrato medidas en pastos marinos y en gorgonáceos (Sánchez *et al.*, 2018).

Además de los nitratos, los fosfatos también alteran la estructura fundamental y función de los sistemas marinos aumentando la productividad primaria (Howarth *et al.*, 2000). La concentración más alta a nivel de sitio y nivel local fue en Playa del Carmen 3, y cabe mencionar que es la concentración más alta reportada en los trabajos en el Caribe mexicano, mientras que Tulum tiene la concentración más baja de fosfatos. Las concentraciones de fosfatos varían según las temporadas climáticas de lluvia y la temperatura (Romero-Sierra *et al.*, 2018), sin embargo, en este trabajo no se evaluaron esas variables, por lo que solo se puede considerar como una medición en un tiempo y espacio específico.

En el reporte de la SEMARNAT (2016) indica que para el norte del Caribe mexicano la concentración de fósforo reactivo soluble es más alta que lo indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, para este trabajo no se tomó en cuenta dicha norma ya que no es para uso de agua costera y protección para la vida acuática. Por tal motivo, se compara entre los sitios ya que no hay límites específicos para agua de mar. Además de la comparación entre sitios, se compara también con los criterios de calidad de agua CE-CCA-001/89 publicados en el Diario Oficial de la Federación que especifican el límite para agua de mar, los cuales indican que el límite de fosfatos es de $0.002 \text{ PO}_4^{-3} \text{ mg/L}$ y considerando este valor todos los sitios de este trabajo rebasaron ese límite. Los criterios de calidad en el artículo dos indican que los límites son “el grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua marina”.

El 2008 fue un año con una alta concentración de fosfatos indica Herrera-Silviera *et al.*, (2015), después de este año hasta el 2014 reporta una concentración baja de fósforo menor a $1 \text{ PO}_4^{-3} \text{ } \mu\text{mol/L}$, sin embargo, en este trabajo se reportan valores más altos, particularmente en Playa del Carmen con $10.85 \text{ PO}_4^{-3} \text{ } \mu\text{mol/L}$. Sitios en Akumal y Punta Nizuc también presentan valores altos, mayores a $2.5 \text{ PO}_4^{-3} \text{ } \mu\text{mol/L}$ (Anexo 2).

Nitrito y Amonio

Con respecto al nitrito, particularmente en la localidad de Akumal en este trabajo se reporta un valor de $0.31 \text{ N-NO}_2^- \mu\text{mol/L}$ promedio (Tabla 3), muy similar al valor mínimo encontrado por Hernández-Terrones *et al.*, (2015) en la misma zona de Akumal. Los mismos autores reportan valores mayores de amonio a los encontrados en este trabajo, así como los demás autores consultados; excepto el trabajo de Hernández-Terrones *et al.*, (2011) que reporta para Puerto Morelos valores de $0.02 \text{ N-NH}_4^+ \mu\text{mol/L}$ de amonio. Por lo tanto, este trabajo reporta valores menores de amonio a los reportados en el Caribe mexicano; mientras que el nitrito reporta valores similares a Akumal y Punta Nizuc.

Según SEMARNAT, (2016) los valores de nitrito y amonio son superiores a los permitidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, como se ha mencionado antes esta norma no contempla agua de mar. En los criterios de calidad del agua CE-CCA-001/89 se observa que para nitritos todas las concentraciones fueron superiores a límite y para amonio casi el 50% de los sitios estuvieron por debajo del límite. Ambos nutrientes están sujetos a fenómenos meteorológicos como huracanes y actividades dentro del continente como lo mencionan Herrera-Silveira (2006) y Herrera-Silveira *et al.*, (2014).

Índice de estado trófico TRIX

El índice de estado trófico surgió como una herramienta para trasladar datos técnicos que ayuden a visualizar las condiciones de cuerpos de agua, utilizando una manera simple de representarlos (Vascetta *et al.*, 2008). En este trabajo además de asignar la condición, se asignó un color a la condición para identificar fácilmente el estado trófico. A nivel local se encontraron dos condiciones diferentes en lo que en este trabajo se decidió separar al centro y norte, en color amarillo que se podría decir como mesotrófico se identificó al centro del Caribe mexicano y en color rojo con una posible condición eutrófica al norte. Cabe mencionar que en este trabajo se ha mencionado que, en la revisión de trabajos de años pasados, indican que las características del agua del Mar Caribe son oligotróficas, sin embargo, el resultado del índice muestra lo contrario; como se ha mencionado son resultados de un momento, por lo que se deben realizar más investigaciones en el espacio y el tiempo para confirmar un posible cambio en la condición del agua del Caribe mexicano.

En el presente trabajo se reporta valores de 4.9 hasta 8.7 del índice TRIX, no se tienen resultados con respecto a tiempo, sin embargo, en estudios que hacen monitoreos anuales

se observa que el comportamiento varía en un rango dependiendo de los factores locales, tal es el caso de Aranda-Cirerol, (2004) que reporta que los valores de índice TRIX para noreste de Yucatán indican que el agua costera tiene una condición moderada a altamente productivas y que tiene valores entre 4.0 y 6.0 durante el año 2000, e indica que esta condición está ligada a factores como las descargas de agua del continente y el turismo principalmente.

Como se ha mencionado las condiciones del agua para el Caribe se reportan como baja en nutrientes, y en este trabajo se observaron valores altos de nutrientes. En lagunas costeras la poca circulación puede provocar aguas eutróficas, como el trabajo de Cervantes-Martínez *et al.*, (2014) que reporta aguas altas en nutrientes en dos lagunas costeras en Isla Mujeres, Quintana Roo en lluvias y secas, y dada su conexión con el Caribe mexicano podrían ser también un aporte de nutrientes al mar, particularmente por la evaporación de agua y el aumento en las concentraciones de nutrientes y la eutrofización de las lagunas costeras. En el trabajo de Hernández, reporta que el nitrógeno que llega al arrecife de Puerto Morelos de la Laguna Nichupté a es de 2,397 Kg NID/Km y de fosfatos de 75 Kg P/Km por año, y de 58.8 μM NID/día y de 0.83 μM PO_4^{-3} /día y en este trabajo los valores NID no rebasan los 30 μM NID por sitio, y para fosfatos 10 μM PO_4^{-3} por día. En conclusión, las lagunas costeras pueden ser un importante aporte de nutrientes para arrecifes adyacentes a zonas kársticas.

En la situación particular para Punta Nizuc se observa que la calidad del agua es mala, tiene un alto contenido de nutrientes en todos los sitios, mientras que el reporte de la SEMARNAT, (2016) indica que la condición del agua depende de la cercanía de la costa ya que realizó un monitoreo por un periodo de cinco años. Este reporte indica que en sitios en donde se realizó este trabajo la calidad es mala, excepto en un año que la reporta mala o regular. Las variaciones en la calidad del agua en Punta Nizuc pueden estar relacionadas con dos factores según este reporte, la influencia de la Laguna Nichupté que descarga en este polígono y la influencia turística. Este reporte no presenta datos que sustenten dichas influencias, aunque estén reportados en otros trabajos, en ese sentido, se podrían sumar dos factores más que pueden influir en la condición del agua, una es la población cercana a los sitios y la otra la cantidad de agua residual descargada a la costa (en el caso de la Península de Yucatán al acuífero). El aumento de estas variables es directamente proporcional a la posible perturbación a las comunidades.

La población podría resultar importante como complemento al analizar la calidad del agua, el estado de Quintana Roo ha tenido crecimiento poblacional desde los años ochenta; además de tener los dos municipios (Tulum y Solidaridad) con mayor crecimiento en Latinoamérica (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011-2016; INEGI, 2010). Si el crecimiento de la población va en aumento (como se estima que siga), aumentará la necesidad de agua y su saneamiento. En algunos documentos como los de Herrera-Silveira y colaboradores (2005), Bautista y colaboradores (2011) y el de Torres Díaz y colaboradores (2014) hablan de la problemática que tienen el Estado de Quintana Roo, y en general la península para el tratamiento de agua, las descargas y contaminación del acuífero, indican que hasta el 90% de las descargas al acuífero no están debidamente tratadas.

Si bien en este trabajo no se centra en tratar el tema de descargas de agua al acuífero, si se presentan volúmenes estimados de agua residual ilegal vertida al acuífero. Playa del Carmen y Punta Nizuc son las localidades con mayor volumen de agua residual descargada; tomando en cuenta los habitantes en estas localidades son diez veces más que las localidades del centro (Tulum y Akumal) y la calidad del agua con el índice TRIX indica que tienen una condición eutrófica o mala, se puede inferir que los habitantes y el volumen de descargas influyen en la calidad del agua. Por otro lado, en Tulum y Akumal no se encontraron registros de descargas al acuífero ilegales, tienen una población 36 veces menor que el municipio de Benito Juárez y una calidad de agua regular o mesotrófica. En conclusión, la población y las descargas podrían resultar importantes a la hora de analizar la calidad del agua.

Bentos arrecifal

La degradación de los arrecifes de coral en el Caribe mexicano aumentó drásticamente entre el año 2000 y 2010, y siguió en aumento hasta el tiempo presente, esto incluye la reducción de la cobertura de coral vivo y la pérdida de diversidad de especies, además del incremento del recubrimiento de macroalgas carnosas (Burke y Madems, 2005, SEMARNAT, 2016, McField *et al.*, 2020). En el presente trabajo se observó una tendencia de aumento de cobertura de algas de centro a norte, así como un decremento de cobertura de coral en el mismo sentido. Particularmente en Tulum se observó una variación en los sitios, tomando en cuenta la tarjeta de reporte de McField *et al.*, (2020), en promedio esta localidad estaría en la categoría de cobertura de corales en regular a buena; mientras que Akumal estaría en mal a regular y Playa del Carmen y Punta Nizuc estarían en crítica a

regular. Dejando las localidades del norte con una condición vulnerable debido a la baja cobertura coralina.

En el caso de macroalgas carnosas se observó algo inverso a los corales. Se debe tomar en cuenta que no hubo una separación por profundidad y cercanía a continente, ya que al tomar en cuenta estas variables podría haber una tendencia de centro a norte, además, una tendencia donde los sitios más alejados a costa tendrían mayor diversidad que los sitios cercanos a la costa como lo menciona Graham *et al.*, 2017 en su estudio de patrones de distribución.

En caso de los demás grupos bentónicos no se observó ninguna tendencia tanto para la arena como para las esponjas. La arena en el Caribe mexicano está formada por sedimentos calcáreos debido a la ausencia de sistemas fluviales provenientes del continente y están formados principalmente por roca coralina. Las condiciones del sustrato (arena) son cambiantes y tienen influencia por factores físicos como corrientes, oleaje y fenómenos meteorológicos (Aguayo *et al.*, 1980), como se observó en este trabajo no se encontró ningún patrón de distribución, como lo podrían ser la degradación de corales y la formación de pavimento coralino o roca coralina.

En Punta Nizuc se tiene registro que, un aumento en la cobertura algal en la primera barrera con una cobertura del 13.4%, mientras que en la Tercera Barrera se observó un decremento que varió en 5.9%. Los monitoreos realizados anualmente por el personal de la CONANP entre 2006 y 2015 muestran que, sobre todo en los últimos tres años, el estatus de la mayoría de las unidades arrecifales ha pasado de “Mal” en 2012 (7.8 %), a “Regular” en 2015 (13.5 %) (SEMARNAT, 2016). McField *et al.*, reporta en 2020 una cobertura de macroalgas de más del 25%, y este trabajo reporta un 42.2% lo que indicaría que Punta Nizuc se encuentra en mal estado, tomando como referencia la tarjeta de reporte podría llegar a ser crítico por la cobertura de macroalgas.

En la localidad de Akumal se obtuvo un porcentaje mayor a 20% de macroalgas carnosas, 25% de coral muerto y 21.2% arena. El trabajo de Garza-Pérez *et al.*, (2010) se observa la misma composición del porcentaje del bentos con la misma metodología de videotransectos en Akumal. Roy, (2014) indica que el cambio de cobertura de dominancia coralina a otros grupos bentónicos inicio desde 1990 y se ha deteriorado particularmente los arrecifes en Akumal por fenómenos naturales, enfermedades y blanqueamientos de corales.

Si bien en este trabajo se ha mencionado que hay una tendencia de cambio del centro al norte, de mejores a peores condiciones de diversidad y de cobertura de coral, Arias-González *et al.*, (2011) en su trabajo reporta que pequeños aumentos y disminuciones de la riqueza total y particularmente la riqueza dentro de las familias (corales y peces), siguieron los aumentos y disminuciones del área de arrecife, cobertura de coral vivo y complejidad del hábitat en diferentes e interesantes sentidos. Es decir que hay condiciones propias de cada zona, y si bien se puede agrupar las localidades por sus condiciones, estas están sujetas a factores como calidad del agua, turismo, densidad poblacional y a escalas como lo son las interrupciones que tiene la barrera del SAM, provocando así que se puedan separar la zona centro y la zona norte; ya que físicamente están separadas, por lo que resulta importante incluirlas en estudios futuros.

Corales

La heterogeneidad de especies de escleractinios a nivel regional en el Caribe mexicano es consecuencia de una acumulación histórica de especies provenientes del Gran Caribe (Jordán-Dehlgren y Rodríguez-Martínez, 2001). En este trabajo se reportan 25 especies de corales de las 66 especies de corales que hay en México (CONAGUA. 2017). En parque Occidental de Punta Cancún, Punta Nizuc e Isla mujeres se reportan 33 especies de corales duros (SEMARNAT, 2016).

En el presente trabajo se reportan a los gorgonáceos como el grupo dominante ya que, en todas las localidades, y en la mayoría de los sitios se obtuvo un porcentaje, que en algunos casos fue más del 50% de la cobertura de corales. En el reporte de SEMARNAT, (2016) también reportan este grupo como dominante del filo Cnidaria, ya que forma densos “jardines” en los arrecifes del norte que Quintana Roo. En conclusión, el grupo de los gorgonáceos dominan los arrecifes de Quintana Roo, tanto del centro como los del norte.

En la localidad de Tulum se reportan 19 especies de corales, siendo la localidad con mayor riqueza de especies. La especie con mayor porcentaje de cobertura fue *A. palmata*, una especie dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría sujeta a protección especial, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo (SEMARNAT, 2016). Esta especie ha funcionado históricamente como un constructor de marco primario en muchos arrecifes poco profundos del Caribe (Albright *et al.*, 2010). En un estudio de Hernández-Delgado *et al.*, (2008) indica

que esta especie es sensible a la contaminación particularmente por aguas residuales, y que está relacionada negativamente con la presencia y el aumento de agua residual. Por lo tanto, es posible que Tulum, al ser la única localidad con un alto porcentaje de cobertura de esta especie, está menos impactada por aguas residuales, sin embargo, se deben realizar más estudios para identificar *A. palmata* a lo largo de la costa del Caribe mexicano, con un mayor esfuerzo de muestreo dirigidos.

Akumal fue la segunda localidad con mayor cobertura de coral, se reportaron 18 especies de corales y también con familias de corales constructores, pero tuvo un porcentaje bajo en comparación con Tulum, la distancia entre estas localidades de alrededor de 18 km y ambas localidades cuentan con características similares con cabezos aislados y algunas zonas con arrecifes marginales continuos; en el trabajo de Garza-Pérez *et al.*, (2010) reporta 34 especies de corales duros en 38 transectos, casi el doble de especies de corales en Akumal reportadas en este trabajo; una posible respuesta puede ser que tiene un esfuerzo de muestreo mayor.

En este trabajo se reporta la especie *Mycetophyllia ferox* como la dominante en términos de porcentaje de cobertura, esto considerando que es una especie altamente competitiva por encima del género *Agaricia*, sin embargo, ambas especies se consideran colonias con forma de láminas superpuestas, pero la dominancia de *Mycetophyllia ferox* podría resultar positiva ya que las poblaciones de esta especie no tolera tasas de mortalidad altas, por mucho tiempo, y también es altamente susceptible a enfermedades (Dustan. 1977 y Buss y Jackson, 1979). El trabajo de Garza-Pérez *et al.*, y este trabajo coinciden en un género como dominante en Akumal, el cual fue *Agaricia*, ambos trabajos lo reportan y se debe considerar que hay una brecha de diez años de los reportes. Estos resultados se pueden deber a por un lado, a que el género *Agaricia* es uno de los más abundantes del Caribe según Godfriend (1985), y también se puede considerar que esté género prefiere aguas mesotróficas a oligotróficas como lo indica González-Díaz y colaboradores (2008), y Akumal resultó tener aguas mesotróficas por el contrario de las localidades al norte en donde *Agaricia* no fue la más abundante y el agua llega a ser eutrófica.

En Playa del Carmen no existe ningún estudio en general de arrecifes de coral y de fauna asociada a ellos, por lo que este estudio es un precedente para la información de esta localidad. Se registró una menor riqueza de especies que el centro del Caribe mexicano con solo nueve especies de corales duros, y se reportan especies con alto porcentaje de colonización *A. tenuifolia* y *M. alcicornis* (Buss y Jackson, 1979), y como se ha mencionado

la baja cobertura de corales constructores como se obtuvo en esta localidad está relacionado dentro otros factores a la influencia de agua residual (McField *et al.*, 2020 y Hernández-Delgado *et al.*, 2008). Por lo que se puede indicar que, en términos de especies con importancia ecológica, Playa de Carmen presenta los resultados menos favorables por su bajo porcentaje de cobertura de géneros como *Acropora*, *Siderastrea* y *Montastrea*.

En Punta Nizuc se presentó algo muy parecido a Playa del Carmen con menos especies que en el centro del Caribe mexicano, con la diferencia que se reporta un porcentaje de *A. palmata* mayor que Akumal y Playa de Carmen. Se ha mencionado en este trabajo que según los antecedentes esta especie está relacionada con la calidad del agua, ya que, la mala calidad del agua afecta negativamente sus poblaciones, y tomando en cuenta que la población en el norte del Caribe mexicano es muy densa, mayor que Akumal, se puede inferir que existen mayores esfuerzos para mantener saludable la zona, ya que Punta Nizuc está dentro de la protección de CONANP al ser un ANP, además hay múltiples esfuerzos de repoblación de especies del género *Acropora*. La especie *M. complanata* fue la especie de coral más abundante en el reporte de SEMARNAT, (2016) mientras que en este estudio se reporta una especie del mismo género *M. alcicornis* como dominante, lo que nos lleva a inferir que este género puede ser dominante en el Caribe, ya que, en el estudio de Castro *et al.*, 2006 también lo reportan como una especie dominante en al sur del Caribe.

Algas

Las macroalgas, un grupo que tuvo una cobertura dominante en por lo menos dos localidades de este estudio, se reporta que hay un cambio de fase de coralina a algal, sin embargo, no se encontraron estudios históricos que lo confirmen. Algunos reportes sugieren que el aumento de cobertura algal puede ser un indicativo para la salud de un arrecife ya que están ligadas a la concentración de nitratos y fósforo (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). La cobertura media de macroalgas carnosas aumentó en aproximadamente un 12% en la región norte de Quintana Roo entre 2005 y 2014 según Suchley *et al.* (2016). Algunas especies de macroalgas carnosas inhiben el reclutamiento de las larvas coralinas o reducen la fecundidad coralina o tapizan los corales vivos. Por otro lado, las algas coralinas construyen o cimentan las estructuras arrecifales; puede indicar buenas condiciones para el reclutamiento de larvas de corales (Lang *et al.*, 2012). Cabe resaltar que, del porcentaje de cobertura de algas, el 65% pertenece a algas carnosas y solo un 15% y 12% a algas calcáreas y coralinas respectivamente, por estos porcentajes se puede deducir que hay una mayor colonización de algas carnosas y por lo tanto se ve reflejado el

cambio de fase en los arrecifes de centro y norte de Quintana Roo. Segrado (2010), obtiene resultados similares, e indica que el aumento de algas o *turnoff* de algas, aumenta el porcentaje de herbívoros, pero también el de carnívoros, por lo que se podría deber a que se esté pasando por una condición de transición.

A nivel regional para el centro y norte de Quintana Roo se identificaron 46 especies de macroalgas, que representa menos del 10% de las especies reportadas para Quintana Roo (Cetz-Navarro *et al.*, 2008). En el trabajo de Delgado-Pech, (2016) reportan 104 especies de macroalgas correspondientes a Isla Contoy y Puerto Morelos, la diferencia de la riqueza de especies con ambos trabajos es el esfuerzo del muestreo y la estrategia de muestreo, toda la identificación de macroalgas en este trabajo fue *in situ*, mientras que en los dos trabajos hubo un trabajo de laboratorio.

En Punta Nizuc se presentó una dominancia en términos de abundancia de algas carnosas, y según la SEMARNAT, (2016) la cobertura algal en Punta Nizuc particularmente en la primera y tercera barrera aumentó en más del 10% en cerca de diez años, alcanzando hasta un 60% de cobertura de algas, sin embargo, no menciona al grupo funcional que pertenece. Recapitulando no hay información concreta de los grupos funcionales en Punta Nizuc, por lo que este trabajo estaría reportando la composición en abundancia de grupos funcionales de algas para Punta Nizuc.

En Playa del Carmen y Tulum, existe poca información de la composición de macroalgas. Tulum tiene un mayor porcentaje de algas carnosas que Playa del Carmen, sin embargo, también tiene un porcentaje más alto de algas coralinas y calcáreas y como se ha mencionado estas últimas contribuyen con la formación del arrecife (Lang *et al.*, 2012). Por lo que Tulum pese a su alto porcentaje de algas, podría tener mejores condiciones para los corales, tomando en cuenta que tiene es la localidad con mayor cobertura de corales.

En Akumal se reportó una cobertura de macroalgas de 30%, en este sentido otro autor Garza-Pérez *et al.* (2010) reporta una cobertura de 37% de macroalgas en Akumal por lo que según lo observado el porcentaje disminuyó en los últimos años. Esto es favorable ya que, según el mismo autor, el alto porcentaje de cobertura de macroalgas está relacionado con el incremento de nutrientes, la temperatura y la falta de herbívoros. Por lo tanto, si en Akumal se redujera el porcentaje de cobertura de macroalgas, podría haber un decremento en los nutrientes o bien un aumento en la comunidad de peces herbívoros.

Peces

Los resultados de Micheli y colaboradores (2014) evidencian una alta vulnerabilidad de la diversidad, su función y los servicios ecosistémicos de los arrecifes del Caribe ante los impactos humanos. Surge la necesidad de conservar conjuntos de especies funcionales, además de taxones focales de importancia ecológica y económica, a través de enfoques de gestión basados en ecosistemas y las relaciones entre comunidades. También resaltan la relación que hay con la diversidad de peces con la diversidad de invertebrados bentónicos, ya que estos últimos son un grupo importante en su alimentación de los peces y contribuyen a la estructura del ecosistema.

En el presente trabajo se reportaron 85 especies de peces, que son menos de las especies reportadas en otros trabajos como se mencionó en los antecedentes de este trabajo, fue mayor en los trabajos realizados por Basurto-Lozano, (2001) con 71 especies en Ixlaché, Quintana Roo y Garza-Pérez *et al.*, (2010) en Akumal con 81 especies. En los estimadores de riqueza, Bootstrap fue la curva que más se acercó a la riqueza observada por lo que se considera como un esfuerzo de muestreo adecuado. Se debe considerar que la metodología utilizada no contempló peces crípticos, nocturnos, juveniles o de profundidad, en la mayoría de los estudios al ser enfocados en un taxa aumentan el esfuerzo del muestreo y contabilizan una mayor cantidad de especies, como se observó en los demás trabajos revisados, que la riqueza de especies fue mayor.

Las familias mejor representadas fueron Haemulidae, Pomacentridae, Lutjanidae y Scaridae que fueron encontradas en todos los sitios de muestreo. Las familias Haemulidae y Pomacentridae tienen una preferencia por el grupo bentónico de macroalgas o *turn off* de algas (Nagelkerken *et al.*, 2000), y en este estudio las macroalgas tuvieron el mayor porcentaje de cobertura bentónica en la mayoría de las localidades. Estas familias de peces también son reportadas en la mayoría de los estudios como las familias que presentan un gran número de especies en el Caribe mexicano. Sin embargo, hay una variación en el número de especies reportadas en la literatura previas a este trabajo, una posible explicación a este cambio en las especies claves es que en los últimos años se ha reportado un cambio en las comunidades bentónicas y por consiguiente puede afectar también las comunidades de peces (Arias-González *et al.*, 2017).

El estudio de Díaz-Ruiz, (2019) indica que las familias mejor representadas en el Caribe mexicano son Serranidae (chernas y meros) con 42 especies y Ophichthidae (morenas)

con 26 especies, mientras que en este estudio las familias mejor representadas fueron Haemulidae y Pomacentridae con ocho especies, Lutjanidae con siete especies y la familia Scaridae con seis especies. Las especies de la familia Serranidae han sido impactadas por la pesca lo que podría estar reduciendo sus poblaciones, adicionalmente se debe considerar que la pérdida de los sitios de reproducción puede disminuir también las poblaciones, haciendo más difícil reportarlos (Acero y Garzón-Ferreira, 1991 y Colás-Marrufo *et al.*, 2002), por otro lado, las familias mejor representadas en este trabajo no tienen un interés comercial importante y su reproducción es local, por lo tanto, podría no verse reducidas sus poblaciones con el tiempo. La familia Scaridae tiene una relevancia particular ya que contiene los peces conocidos como loros los cuales mantienen el arrecife en equilibrio al ser las especies con mayor porcentaje de herbívora (McField *et al.*, 2020).

Especies clave de la comunidad de peces

La especie *T. bifasciatum* tuvo el mayor porcentaje de contribución en todas las localidades, esta especie no tienen un interés para la pesca, únicamente para el comercio de acuario. Por lo tanto, se puede considerar que no tiene reducciones importantes en sus poblaciones, es una especie carnívora principalmente y su dieta se concentra principalmente en moluscos y también se alimenta de otros invertebrados y peces óseos (Martínez-Ramírez, 2005). En estudios como el de Lozano-Álvarez *et al.*, (2007) reporta a los pargos de la familia Lutjanidae como especies clave, y *T. bifasciatum* como especies abundantes en el Parque Chankanaab en el sur de Quintana Roo. En Akumal Molina, (2016) reporta a *T. bifasciatum* como la segunda especie más abundante, solo después de *Chromis cyanea* que está ampliamente distribuida en el sur del Caribe mexicano, mientras que en el presente estudio *C. cyanea* solo fue clave en Tulum y el Playa del Carmen. Chávez-Hidalgo, (2009) reporta a *T. bifasciatum* como especie poco abundante, por debajo de *Mycteroperca bonaci*, *Hypoplectrus guttavarius* y *Scarus coelestinus*, por lo que se puede concluir que el presente trabajo es el único estudio que reporta a *T. bifasciatum* como la especie con mayor abundancia. Esta especie puede estar presente en el Caribe mexicano de manera abundante o frecuente, en este trabajo, las condiciones de los arrecifes en algunos sitios el coral muerto dominó el bentos en centro y norte del Caribe mexicano, y *T. bifasciatum* se encuentra en ambientes de este tipo, además de estar relacionado con ambientes planos con poca complejidad ambiental. El caso de *C. cyanea* podría resultar importante para estudios futuros, ya que podría estar ampliando su distribución.

El estudio de Agudo-Adriani *et al.*, (2019) reporta que *T. bifasciatum* y *Stegastes partitus* es frecuente en hábitats planos y poco complejo estructuralmente. Estas especies se consideran omnívoras y generalistas, a menudo asociadas con sitios degradados de baja complejidad. El coral vivo tuvo un porcentaje de cobertura bajo en todas localidades, sin embargo, el coral muerto estuvo bien representado en todas las localidades, siendo en algunas dominantes, y esta característica está asociada a condiciones de baja complejidad, lo que puede dar como resultado que especies como *T. bifasciatum* y *Stegastes partitus* tengan alto porcentaje de contribución.

Las especies de la familia Chaetodontidae no tuvieron contribución como especies clave, y particularmente *Chaetodon capistratus* no es frecuente, ni abundante en ninguna de las localidades, sin embargo, esta especie está reportada como un indicador de arrecifes perturbados, es decir, es poco frecuente y abundante en arrecifes con baja cobertura de coral, ya que se alimenta de pólipos de coral (Olaya-Restrepó *et al.*, 2008). En conclusión, la poca presencia de *C. capistratus* en las localidades del centro y norte de Quintana Roo, indicaría son arrecifes perturbados, dada su baja cobertura coralina y la ausencia de la especie.

En Punta Nizuc las especies que tuvieron el mayor porcentaje de contribución con un 42.43% (análisis SIMPER) fueron *T. bifasciatum*, *A. coeruleus*, *H. garnoti*, *S. partitus* y *A. tractus*. En Punta Nizuc se reportó el mayor porcentaje de *turn off* de algas y es reportado en otros trabajos (SEMARNAT, 2016) que los peces cirujanos de la familia Acanthuridae son importantes en la herbívora del Caribe mexicano.

En Tulum y Playa del Carmen las especies con el 29.21% de contribución fueron *T. bifasciatum*, *Halichoeres bivittatus*, *A. sexatilis*, *L. griseus* y *A. coeruleus*, siendo las especies más frecuentes y abundantes. Las cinco especies son principalmente utilizadas como especies de acuario, y algunas para pesca menor (Fishbase, 1999). Una posibilidad para su alta contribución podría ser que, al no tener una gran importancia pesquera, sus poblaciones no son impactadas como ya se había mencionado de *T. bifasciatum*.

En Akumal las especies clave que representan el 45.06% de la contribución son *T. bifasciatum*, *H. garnoti*, *A. tractus*, *A. coeruleus* y *H. flavolineatum*, mientras que en el estudio de Garza-Pérez *et al.*, (2010) no reportan ninguna de estas especies como abundantes, ni frecuentes, sin embargo, reporta especies de la familia Acanthuridae y Haemulidae como las más abundantes. Se debe considerar que el precedente tiene 10

años de diferencia y por lo tanto al reportar especies diferentes como claves se podría estar hablando de un cambio en la comunidad de Akumal.

Las especies de la familia Scaridae resultan de gran importancia para el equilibrio del ecosistema, ya que son especies que mantienen la herbívora del arrecife, el funcionamiento y la resiliencia del ecosistema arrecifal (McField *et al.*, 2020). Se han reportado en los últimos años la baja en sus abundancias y biomásas por la sobreexplotación pesquera (Díaz-Ruiz *et al.*, 2019). En el presente estudio se reportan en Tulum *S. viride*, *S. rubripinne* y *S. taeniopterus* como especies clave con un 11.15% de contribución, en Akumal *S. viride* y *S. iseri* con un 8.44% de contribución, en Playa del Carmen *S. viride*, *S. rubripinne* y *S. taeniopterus* con 11.12% de contribución y en Punta Nizuc únicamente *S. viride* con un 5.1% de contribución y como se verá más adelante Punta Nizuc es la localidad con mayor porcentaje de algas junto con Playa del Carmen. Resulta importante para el Caribe mexicano poner especial énfasis en el estudio de especies clave, dada su importancia ecológica y como ejemplo, el esfuerzo por conservar la especie protegida de “pez loro” en Quintana Roo, México, en todo Belice y Guatemala y en las Islas de la Bahía de Honduras ha rendido frutos aumentando su biomasa en los últimos años en Sistema Arrecifal Mesoamericano (McField *et al.*, 2020).

La riqueza de especies es importante para una zona porque es una manera de representar la biodiversidad, en este trabajo también se plantea la ampliación de distribución de algunas especies por la falta de estudios que confirmen la presencia en las localidades que se muestrearon. En Playa del Carmen todas las especies amplían su distribución, no existe ningún estudio previo de la localidad (Anexo 6); y en la revisión de bases de datos tampoco se confirmó ninguna especie, solo se presenta que Playa del Carmen es potencialmente su zona de distribución

Lutjanus jocu es una especie que amplía su distribución en centro y norte de Quintana Roo, ya que en los trabajos de Burgos-Legorreta, (1992), Guevara-Muñoz, (1998), Nuñez-Lara *et al.*, (1998), Arguelles-González, (1999), Schmitter-Soto *et al.*, (2000), Basurto Lozano, (2001), García Hernández, (2001), Chávez-Hidalgo, (2009), Molina Hernández, (2016) y en las bases de datos tanto especializadas como no especializadas, no existen reportes de presencia de la especie en las localidades que se muestrearon.

Diversidad de peces

Cualquier estudio de diversidad de peces depende del conocimiento de la fauna íctica regional, pero con frecuencia se supone que la lista de especies que existen en un área determinada es un indicador confiable de lo que se puede esperar que ocurra allí en un tiempo y espacio específico. La lista de especies de peces para cualquier área de arrecifes de coral bien estudiada, comúnmente es cinco veces mayor que la cantidad de especies que se puede esperar que se capturen en una sola colección intensiva. Los estudios de diversidad con frecuencia dependen de censos visuales hechos a lo largo de líneas, a menudo seleccionadas al azar, durante períodos de tiempo establecidos. Para los peces costeros bentónicos y especialmente para los que viven en arrecifes de coral, tales métodos, por sus limitaciones inherentes, detectarán solo una pequeña parte de la fauna críptica, por lo tanto, los censos visuales están claramente sesgados (Robins, 1991).

Los listados de especies se consideran como una aproximación de lo que se puede encontrar en regiones aledañas (Robins, 1991). En el presente estudio se observó que, para peces, la diversidad según el índice de Shannon-Weaver (H') fue alta para todas las localidades, sin embargo, conforme se evaluó la diversidad a una escala menor, también disminuyó el valor de H' aunque en ningún caso a nivel de sitio llegó a ser una diversidad baja (menor a 2.8 bits/ind). En algunos estudios como el de como el de Chávez-Hidalgo, (2009) reporta una alta diversidad en Tulum (4.1 bits/ind), Isla Mujeres (3.4 bits/ind), Punta Nizuc (3.5 bits/ind) sin embargo, es un trabajo de documentación y excluye especies ocasionales (contabilizadas una sola vez o que no tengan hábitos arrecifales). El presente trabajo reporta una mayor diversidad en todas las localidades, siendo Tulum y Akumal las localidades con la mayor diversidad.

Chávez-Hidalgo, (2009) reporta una mayor equitatividad de Pielou en Tulum con 0.71 y Punta Nizuc 0.74, la equitatividad es una medida del grado de homogeneidad de la representación de la abundancia de todas las especies; entre el valor más se acerque a 1 hay una mejor repartición de la abundancia en las especies. Por lo tanto, un valor cerca de 0.5 indica un mayor equilibrio en la abundancia de la comunidad, ya que se considera que hay especies con una clara dominancia y especies poco abundantes, reflejándose lo que se dice en la teoría ecológica (Odum, 1972).

La diversidad local como se ha mencionado antes fue alta en todas las localidades, y el estadístico de t de Hutchenson indicó que existen diferencias significativas entre Playa del

Carmen con Tulum y con Punta Nizuc. La diversidad presenta un cambio en Playa del Carmen con respecto a otras localidades, esta localidad es menos favorecida ya que tiene baja cobertura coralina y alta cobertura de macroalgas, y se les podría atribuir un efecto sobre la diversidad de peces.

La diversidad a nivel de sitio es alta con equitatividades medias en este estudio, sin embargo, Garza-Pérez *et al.*, (2010) reportan una diversidad baja de $H' = 2.5$ bits/ind en la laguna arrecifal de Akumal; la diferencia podría deberse al esfuerzo del muestreo o al cambio de las condiciones con el tiempo, como lo menciona Agudo-Adriani *et al.*, (2019). Una alta diversidad de peces se ha asociado con la naturaleza altamente heterogénea de los hábitats en múltiples escalas espaciales; por lo que se puede concluir que hay una relación de la alta diversidad de peces encontrada en el Caribe mexicano con la heterogeneidad de los hábitats. Es necesario realizar estudios no solo con variaciones espaciales, sino también con variaciones en el tiempo; también cabe resaltar que, si bien el grupo de los peces está bien estudiado en el Caribe mexicano, pocos estudios miden la diversidad alfa.

Diversidad taxonómica de peces

Se encontraron pocos estudios de peces en el Caribe mexicano reportando su diversidad taxonómica, los principales reportes son de abundancia, riqueza, biomasa y diversidad medida por índices de Shannon-Weaver y Simpson. Por otro lado, los índices de diversidad taxonómica son medidas relativas, para uso en comparaciones dentro de un estudio, en lugar de tener alguna validez global absoluta. La biodiversidad es "la suma de la diversidad taxonómica o numérica y la diversidad ecológica, genética, histórica y filogenética" y la diversidad taxonómica se acerca más a explicar esta medida que la diversidad de Shannon (Van der Spoel, 1994). El estudio de Warwick y Clarke, (1995) comienza a sugerir la intrigante posibilidad de que el complemento genético total en cualquier bioma pueda, dentro de ciertos límites, permanecer más o menos constante, pero estar dividido de manera diferente entre la jerarquía de unidades taxonómicas, según la edad o la sucesión de la etapa del ensamblaje. Por lo tanto, los resultados en este estudio es un reflejo de las condiciones actuales de las localidades estudiadas, si bien son datos de un instante, la historia de vida del taxón es reflejado a través de la diversidad y se resalta la importancia de incluir este tipo de índices en los estudios de comunidades de peces.

Un alto valor de Δ refleja baja relación entre las especies, y por lo tanto, se muestran así las comunidades más diversas taxonómicamente (Clarke y Warwick, 1998). Akumal presenta una baja relación entre especies y por lo tanto es más diverso que el resto de las localidades; por otra parte, Tulum presenta una alta relación entre especies y por lo tanto baja diversidad taxonómica. No obstante Playa y Punta Nizuc también presenta una baja diversidad taxonómica, tomando en cuenta que el valor para la región del norte de Quintana Roo.

De acuerdo al índice de Shannon-Weaver la comunidad de peces resultó tener una alta diversidad, y resultaron ser diferentes entre sí según la t de Hutchenson; la diversidad taxonómica también refleja una variación importante. Tres de las cuatro localidades tienen un valor pequeño de Delta y únicamente Akumal tiene un valor alto de Δ . En otros trabajos se han reportado valores parecidos a Akumal, como es el caso de Barjau (2012) que reporta un valor de promedio de $\Delta^+=56.66$ y $\Lambda^+=113.12$ para la comunidad de peces en el Golfo de California, y que indica que pueden estar relacionados con sobreexplotación pesquera y procesos de extracción de minerales en el continente y que los jales pueden llegar a la costa.

Tulum y Akumal obtuvieron los valores más altos de Λ , y esta es una medida de no equidad en la estructura a través de las unidades taxonómicas. Por lo tanto, un alto valor de Λ^+ en el centro del Caribe mexicano indica sobre representación de los taxa en las muestras y está relacionado con ambientes poco perturbados a través del tiempo, es decir existe una frecuencia en ciertas ramas de grupos dentro del taxa (Warwick y Clarke, 1998). Si bien es positivo, al tener en cuenta las demás variables como pérdida de coral y aumento de nutrientes y considerando que podrían ir en aumento, la diversidad taxonómica podría disminuir con el tiempo.

La diversidad taxonómica es reflejo de la condición de los taxones como respuesta al tiempo, por tal motivo se coincidiera como indicador de perturbaciones como se vio previamente (Warwick y Clarke, 2002). En conclusión, se puede considerar a Akumal como la localidad con menor perturbación, seguido de Tulum, por otro lado, Playa y Punta Nizuc se podrían considerar como las localidades con mayor perturbación como lo es la baja cobertura coralina y el aumento de nutrientes por los bajos valores de Delta y Lambda.

PERMDISP y PERMANOVA de la comunidad de peces

El análisis previo que ayuda a conocer la homocedasticidad de los datos PERMDISP y que por sí mismo refleja la beta diversidad (Anderson *et al.*, 2008) indica que la comunidad de peces tiene una homogeneidad en la dispersión de los datos, que para el análisis se tomó la abundancia en donde se encontraron diferencias significativas. Esta diferencia con las otras pruebas de la fauna en donde no se encontraron diferencias significativas, puede estar relacionada con la ubicación por localidad o bien la distribución de abundancia.

El diseño de factores se basa en la distribución espacial, ya que no hay datos en series de tiempo y por lo tanto únicamente se evalúa la diferencia entre localidades. El equilibrio de la naturaleza se basa en variabilidad en el espacio y el tiempo, esta variabilidad se mide como cambios o diferencias en la abundancia de especies o en la diversidad del ensamblaje que puede depender de la distribución del hábitat desde centímetros a kilómetros (Underwood *et al.*, 2000). En el caso puntual de peces se observó en una primera prueba de PERMANOVA que existen diferencias significativas en las muestras y la comunidad de peces es diferente a nivel localidad. En una evaluación posterior de Monte Carlo se encontraron diferencias en dos localidades Playa del Carmen y Akumal, como apoyo a esta idea anteriormente se habla de una separación por la condición de calidad del agua, cobertura de corales y especies constructoras, cobertura de algas y particularmente de algas carnosas, población y descargas de agua ilegal. Por lo que se puede concluir que la comunidad de peces es homogénea con una alta diversidad alfa, esto se puede ver claro en la Figura 21, en donde se agrupan los sitios con la abundancia de peces por localidad. También todas las variables antes mencionadas podrían dar como resultado características diferentes para el centro y el norte de Quintana Roo, en caso de peces influyendo de alguna manera en la distribución de la abundancia.

Análisis de componentes principales CANOCO de la comunidad de peces

En el análisis de correspondencia canónica CANOCO se tomaron los nutrientes como eje de correspondencia a las especies dominantes de la fauna. La localidad de Akumal que se relaciona de manera positiva con el amonio y fosfatos en menor medida. Akumal tuvo el valor más alto de amonio, este es tóxico para los peces, sin embargo, no se puede correlacionar con la riqueza y la abundancia ya que haría falta medirlo en los organismos. No se encontró información de la influencia positiva o negativa en la literatura de estos nutrientes con las especies de peces, y dificulta la interpretación del análisis de

componentes. Por lo tanto, se puede considerar esta relación como variables exploratorias, ya que la única variable ambiental confirmada con influencia en la distribución de la comunidad de peces es la temperatura (Graham *et al.*, 2017) y en este trabajo no exploró la relación de esta con los peces. Cabe resaltar que la comunidad de peces además de tener una relación con la temperatura, también se relaciona con la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua para favorecer a los juveniles (Molina-Hernández, 2016), sin embargo, en este trabajo no se contabilizaron juveniles y por lo tanto no se puede establecer un criterio de relación o distribución.

Moluscos

Los moluscos a pesar de ser el segundo filo más rico del reino animal, son menos estudiado que los peces. En el presente estudio se reportan 66 individuos, lo cual representa el 9.0% de los registros en bases de datos, tal es el caso de Miloslavich *et al.*, (2010) que reporta 733 especies de moluscos para México en revisiones de bases de datos como OBIS, Malacolog, SeaLife, Marinespecies, Cepibase, Redciencia y Jaxshells. En comparación con el trabajo de Castillo-Rodríguez, (2014) la riqueza observada en este trabajo representa el 3.1% la riqueza total para el Golfo de México y Mar Caribe. En ambos trabajos se hace una revisión bibliográfica y en bases de datos, en este trabajo se hizo una revisión en trabajos con listados de especies y se encontraron reportadas 270 especies para el Caribe mexicano, algunos de estos trabajos se discutirán a continuación.

Dentro de la riqueza de moluscos reportada en este trabajo, no se contabilizaron las especies de micromoluscos; Hernández-Álvarez, (2019) reporta 120 especies de macromoluscos y micromoluscos ya que analiza muestras de sustrato, mientras que en este trabajo se reporta aproximadamente el 50% de la riqueza de moluscos; se estima que al revisar las muestras de sustrato se podría reportar más especies como se observó en la curva de rarefacción, ya que se observa un potencial de cerca de 130 especies sin contar micromoluscos. En otro estudio, Pérez-Rodríguez, (1980) reporta 78 especies en el Caribe mexicano, utilizando métodos de dragado en 241 transectos, si bien no existe una diferencia como la de Hernández-Álvarez, el esfuerzo del muestreo de Pérez-Rodríguez es mayor para macromoluscos, pero menor en el grupo de micromoluscos. Considerando ambos trabajos se puede concluir que es importante tener una metodología adecuada para cada grupo de moluscos, ya que ambos trabajos utilizan métodos diferentes, resultando el de Hernández-Álvarez más eficaz, en este trabajo la mayor parte de los registros se hicieron *in situ* con la premisa de impactar lo menos posible la comunidad de moluscos, se tomaron

algunas conchas vacías y una cantidad mínima de organismos vivos cuando la identificación podría no ser precisa *in situ*.

Las familias mejor representadas en el Caribe mexicano fueron los gasterópodos Fissurellidae con cinco especies, y Turbinidae, Cypraeidae, Cerithidae, todas con cuatro especies. Las especies de familia Fissurellidae son comúnmente reportadas a poca profundidad en roca coralina (García-Cubas, 2004), y en este estudio la roca coralina fue uno de los grupos bentónicos con mayor porcentaje de cobertura. Solo se encontraron dos antecedentes que reporta a la familia Fissurellidae entre las familias mejor representadas en el Atlántico mexicano, el cual es el caso de Sánchez-Villalobos, (2014) y González *et al.*, (1991), Sánchez-Villalobos también reportan a la familia Turbinidae con mayor contenido de especies con respecto a las demás familias. Castillo-Rodríguez, (2014) indica que la familia Fissurellidae es de las mejores representadas de los gasterópodos en el Golfo de México y el Mar Caribe, sin embargo, no reporta ninguna otra de las familias que se reportan en este estudio. Por parte de las familias de bivalvos las familias Arcidae y Lucinidae tuvieron cuatro especies cada una, y Castillo-Rodríguez y Sánchez-Villalobos las reporta como parte de las familias mejor representadas en el Golfo de México y Mar Caribe. Es notable que hay una variación con las familias mejor representadas, sin embargo, la familia Fissurellidae para gasterópodos y Arcidae para bivalvos son frecuentes en el Caribe mexicano.

Especies clave de la comunidad de moluscos SIMPER

Los resultados del análisis de SIMPER identifican menos especies clave en el grupo de moluscos que en el grupo de peces, los moluscos presentan una mayor contribución por especie, y tienen una menor frecuencia y abundancia que la comunidad de peces. Como lo menciona Miloslavich *et al.*, (2010) los registros de peces demuestran que debido a su biología se encuentran de manera frecuente en arrecifes de coral, los moluscos por otra parte implican un mayor esfuerzo de muestreo y de identificación.

Las especies de género *Cerithium* se encontraron en roca coralina entre oquedades y en pastos marinos, estas especies buscan resguardo de las corrientes y olas según lo comentado por Dibiccari *et al.*, (2010). En la localidad de Tulum representaron el 26.51% de la contribución y en Nizuc el 24.42% de la contribución, en la primera localidad se encontró el mayor porcentaje de coral muerto y en la segunda el mayor porcentaje de cobertura de algas. En otros estudios en el Gran Caribe se reporta abundante las especies

del género como *Cerithium*, tal es el caso de Prieto *et al.*, (2002) también se encuentra asociado a *Thalassia testudinum* junto con otras especies principalmente gasterópodos. En un estudio de recopilación histórica de abundancia de especies de gasterópodos, se encontró que *C. litteratum* fue la más abundante en Isla Verde en Veracruz a través del tiempo (Aguilar-Estrada, 2014). Por lo que se puede concluir que esta especie es abundante en zonas arrecifales en el Golfo y Mar Caribe.

La especie que tiene el segundo porcentaje más alto en Tulum y Punta Nizuc fue *Lithopoma tectum* con un 11.55% y un 16.04% respectivamente, también en Akumal fue la segunda especie con mayor porcentaje de contribución con un 20% de contribución. Esta especie es reportada como la segunda especie más abundante en Isla Verde, sólo después de *C. litteratum* (Aguilar-Estrada, 2014), *L. tectum* está asociada a rocas coralinas y praderas de *T. testudinum* (García-Cubas, 2004).

De las especies clave de moluscos registradas solamente *Coralliophila abbreviata* habita en corales pétreos y gorgonáceos, ya que se alimenta de ellos (García-Cubas, 2004). Esta especie represento un 8.93% de contribución total en la localidad de Tulum, cabe mencionar que Tulum tiene el mayor porcentaje de coberturas de coral vivo. *C. abbreviata* está documentado que se alimenta de los corales *Acropora palmata* y *Montastrea annularis* (entre otras 12 especies de corales duros), y se pueden encontrar hasta 20 individuos por colonia (Baums *et al.*, 2003), sin embargo, en este estudio se observaron sólo dos individuos por colonia y únicamente en *A. palmata* que tiene un alto porcentaje de cobertura en Tulum.

C. abbreviata tiene un bajo porcentaje de depredación de coral vivo, sin embargo, no está claro el daño que provoca en los corales (Baums *et al.*, 2003; del Mónaco *et al.*, 2008), por lo que tal vez no representa una amenaza para los corales. Por otro lado, se puede considerar que, con la pérdida de coberturas coralinas en el Caribe mexicano, y el cambio de fase de coral vivo a coral muerto y macroalgas carnosas, necesariamente existe un cambio en la diversidad. En el posible escenario de la reducción de corales cerebro y corales cuerno de alce, las poblaciones de *C. abbreviata* podrían reducirían también, así como modificar su distribución en el Caribe mexicano.

En cuanto al registro de especies, se observó que 14 especies de moluscos: *Diodora listeri*, *Thylacodes decussatus*, *Bursa corrugata*, *Linatella caudata*, *Polinices hepaticus*, *Coralliophila erosa*, *Americoliva sayana*, *Modiolus squamosus*, *Limaria pellucida*,

Clathrolucina costata, *Transennella stimpsoni*, *Chama sinuosa*, *Papyridea soleniformis*, *Ameritella sybaritica* amplían su distribución o son nuevos registros para la zona centro y norte del Caribe mexicano, ya que se revisaron los trabajos de Pérez-Rodríguez (1999), Sánchez-Villalobos (2014), Hernández-Álvarez (2019), y no se encontraron reportes de la presencia de las especies. También se revisaron bases de datos, sin embargo, en la mayoría de los casos el artículo o documento relacionado con la distribución, no coincidía con un reporte puntual.

Diversidad de moluscos

La degradación de los arrecifes de coral está afectando la estructura de la comunidad al cambiar la diversidad y abundancia de especies, así como el funcionamiento y los servicios de los ecosistemas. La eliminación de determinadas especies y la adición o el aumento de otras por el cambio en el ecosistema (Morillo-Velarde *et al.*, 2018), de ahí la importancia de conocer la diversidad de la fauna en el Caribe mexicano. En el grupo de moluscos la diversidad estuvo marcada por dos zonas diferenciadas en este trabajo, en la zona centro hay una diversidad alta de moluscos según el índice de Shannon-Weaver con una equitatividad cercana a 1 y en la zona norte hay una diversidad baja donde disminuyó también la equitatividad. A pesar de la evidente diferencia en la diversidad del centro y norte del Caribe mexicano, no se puede decir puntualmente a qué factores obedece la distribución de moluscos y solo se puede diferenciar dos zonas por su diversidad, ya que como lo menciona en su trabajo Miloslavich *et al.*, (2010), la distribución de moluscos (gasterópodos y bivalvos) el Caribe, está principalmente controlada por el tipo de hábitat y la distribución (arrecifes de coral, pastos marinos, manglares, costas rocosas, estuarios, etc.), por lo que resulta importante relacionar la diversidad y sus componentes con el tipo de hábitat como se explicará más adelante.

En la literatura se menciona que México tiene poca diversidad de moluscos, refiriéndose a la variedad de especies, y se resalta la falta de estudios que reporten la riqueza de especies, así como la ecología atrás de ello. Se encontraron pocos estudios que reporten la diversidad de moluscos en el Caribe, un aspecto importante en este trabajo. La diversidad encontrada en el centro y norte del Caribe mexicano resultó ser alta en centro y baja en norte. En arrecifes del Golfo de México se reporta una baja diversidad, tales son los casos de (Aguilar-Estrada *et al.*, 2014) que reporta una diversidad de 2.4 bits/ind en Isla Verde, Veracruz. En

el Talud del Banco de Campeche, Álvarez-Sánchez (2006), reporta una diversidad baja de 2.2 bits/ind por arrastre. En el Arrecife Sacrificios también en Veracruz Villanueva-Sousa (2011), reporta una diversidad la diversidad más alta de 4.3 bits/ind con transectos en banda de 62 metros. La diversidad de Shannon no refleja de biodiversidad, no obstante, si refleja en grado de heterogeneidad con base en abundancia y riqueza, si se puede concluir que en centro y el norte de Quintana Roo son dos zonas diferentes en función de la comunidad de moluscos, el centro con mayor heterogeneidad y el norte con menor heterogeneidad. Los ambientes heterogéneos generalmente se presentan como saludables en términos de equilibrio, en conclusión, el centro tiene un mayor equilibrio.

En el Gran Caribe particularmente en golfo de Batabanó, Cuba, Capetillo (2016) reporta una diversidad de promedio de $H' (\log e) = 2.16$ para el año 2007, tomando en cuenta que el índice se realizó con logaritmo natural, mientras que en este trabajo se utilizó \log_2 , al realizar la conversión se observó que ninguna localidad tendría una diversidad alta. Tulum tendría una diversidad de $H' (\log e) = 2.68$ siendo el valor más alto. Capetillo también observó una variación con respecto al tiempo, obtiene para 2006 y 2005 valores menores a $H' (\log e) < 2$.

Considerando el resultado del valor de t de Hutchenson, la diversidad de moluscos es claramente diferente a nivel local, por lo tanto, a nivel de sitio se consideró que también lo sería. Dos sitios Akumal 6 y Nizuc 1 además de tener un valor alto de diversidad, también tienen un valor alto de equitatividad y considerando que cuando más se acerca a uno la comunidad es más homogénea (Rocha *et al*, 2012), por lo tanto, existen pocas especies dominantes y la abundancia está repartida de manera igual en todas las especies. Como se mencionó anteriormente, la comunidad de moluscos no presenta un patrón de distribución a nivel de sitio y está sujeta al tipo de hábitat y las condiciones locales, los sitios presentan diversidades bajas con equitatividades con una gran variación desde comunidades poco diversas pero homogéneas como Tulum 1, 5 y 6, Akumal 2 y 3 y Playa 1, hasta comunidades poco diversas y heterogéneas como el caso de Playa 3.

Como conclusión los índices de diversidad tradicionales pueden no ser un reflejo exacto de la biodiversidad o de las comunidades, pueden explicar una parte de la comunidad, particularmente en función de la uniformidad de la abundancia y la riqueza, sin embargo, es importante incluir otros índices que reflejen la taxonomía y tomar en cuenta las variables ambientales.

Diversidad taxonómica de moluscos

Los moluscos pueden ayudar a comprender los cambios o las variaciones en las comunidades ecológicas en una región determinada (Warwick y Clarke, 2002). En la diversidad por localidad se mostraba un patrón de centro a norte de mayor a menor diversidad, en el caso de diversidad taxonómica se observa algo similar. Tulum y Akumal presentan la mayor diversidad taxonómica, mientras que Playa y Nizuc tienen un valor bajo de Δ .

Existen pocos estudios de diversidad taxonómica de moluscos en arrecifes de coral en México, en el trabajo de Hernández-Padilla (2014) discute los valores diversidad taxonómica de los arrecifes de Sistema Arrecifal Veracruzano, en su trabajo obtiene un valor regional para Isla de Enmedio de $\Delta=66.94$ y $\Lambda^+=102.3$. En los demás arrecifes del sistema se obtuvieron valores de $\Delta=64.69$ 70.48 y $\Lambda^+=12.7 - 197.5$. Esto nos indica que, a nivel local, el centro y norte de Quintana Roo tiene una mayor diversidad taxonómica que Isla de Enmedio, sin embargo, son más una referencia de los valores obtenidos en otra zona que una comparación. La diferencia más importante entre el arrecife de Isla de Enmedio y los arrecifes muestreados en este trabajo, es que Isla de Enmedio es un arrecife tipo atolón con planicies amplias y la literatura dice que las planicies arrecifales es donde hay la mayor diversidad, sin embargo, los arrecifes del Caribe mexicano históricamente tienen mayor diversidad, y esto se ve reflejado en los valores de diversidad taxonómica.

A nivel de localidad los valores obtenidos de Δ y Λ fueron considerablemente menores, entendiéndose que a una menor escala espacial la diversidad taxonómica baja. Las localidades con mayor diversidad taxonómica fue Akumal y Tulum, una condición que con diversidad de Shannon la veíamos reflejada, sin embargo, al utilizar también la distinción taxonómica (Lambda), se puede observar que Akumal y Tulum también presentan valores mayores de Lambda que Playa y Nizuc, por lo que Akumal y Tulum tienen una mayor sobrerrepresentación de los taxa. En cuanto a la diversidad taxonómica se presenta una diferenciación local entre centro y norte de la comunidad de moluscos, y esto a su vez puede reflejar el nivel de perturbación (arrecifes planos con pocas especies constructoras) aún más que la diversidad de Shannon-Weaver (Warwick y Clarke, 1998).

PERMDISP y PERMANOVA de la comunidad de moluscos

La comunidad de moluscos no tiene patrones de distribución con respecto a su abundancia según el análisis PERMDISP, mientras que la prueba PERMANOVA confirma la nula

diferencia entre localidades, lo cual se observó gráficamente en el nMDS donde los sitios son homogéneos y no tienen una variabilidad entre ellos y la abundancia de moluscos.

Análisis de componentes principales CANOCO de la comunidad moluscos.

Para los moluscos, en el análisis CANOCO se observó una relación de los nitratos, fosfatos y clorofila *a* en Playa del Carmen con dos especies de moluscos. En el trabajo de Graham *et al.*, (2017) reporta que las variables con una mayor relación con los invertebrados es el nitrato y la clorofila *a*. Los bivalvos que se alimentan de partículas en suspensión, como el caso de *A. imbricata* que tienen una preferencia con las partículas con un alto contenido de especies de nitrógeno (Ward y McDonald, 1996), esta especie además fue una especie abundante en este trabajo y tiene una particular contribución en la localidad de Playa del Carmen y relación con una de las especies del nitrógeno.

Como se mencionó en los resultados Tulum y Punta Nizuc presentan una relación negativa, influenciada por la baja concentración de nitrato y especies de moluscos carnívoros como *L. tecta americana* y *C. cervus*, bivalvos filtradores como *C. macerophylla* y Poliplacoforos, sin embargo, no se encontró ninguna relación que explicara la relación en distancia euclidiana presentada en el índice CANOCO.

Ecología del norte y centro del Caribe mexicano.

En este trabajo se ha discutido los resultados de la riqueza y diversidad de las especies de peces y moluscos, de la cobertura del bentos particularmente de las algas y los corales; también se abordó la concentración de nutrientes y la condición del agua en un momento específico. Una tarea importante para la ecología es determinar relaciones entre factores bióticos y abióticos.

Se confirma lo planteado por Graham *et al.*, 2017, existe una relación entre la riqueza y abundancia de peces y moluscos. La abundancia de peces fue mayor que la abundancia de moluscos en todas las escalas observadas en este trabajo. La riqueza a nivel local fue más del doble de peces que de moluscos, y nivel regional, hablando del centro y norte de Quintana Roo la riqueza de peces sigue siendo mayor pero la riqueza de peces aumenta. Lo planteado por Graham *et al.*, 2017 es que la distribución de abundancia y riqueza de los taxos, están ligadas a la temperatura, nutrientes (particularmente nitrato) y la lejanía de la costa. Los nutrientes tuvieron mayores concentraciones promedio en el norte del Caribe mexicano, y no se observó que tuvieran una influencia en ambos taxos, pero sí de manera particular en moluscos bivalvos como se vio anteriormente. En conclusión, al reducir la

escala, ya sea por área o por grupos de fauna se puede observar mejor la influencia de nutrientes.

Por el análisis CANOCO que muestra mayor relación con los nutrientes y apoyado del índice de calidad de agua TRIX, se podría inferir que Playa de Carmen es la localidad con mayor influencia de nutrientes del centro y norte de Quintana Roo; para apoyar esta idea también es la localidad con la menor cobertura coralina, se registró un porcentaje bajo de cobertura de especies de corales constructores, y la menor diversidad taxonómica de moluscos, por lo que también apoya la idea de que es la localidad con mayor perturbación.

En cuanto al diseño de factores para clorofila *a* y nitratos, los peces presentaron una respuesta a ambos nutrientes a nivel local. Los moluscos no presentan diferencias significativas, sin embargo, se necesitan más estudios particularmente de bivalvos y nudibranquios, ya que, utilizan estos nutrientes para su alimentación y podría ser más evidente su influencia. Para el caso de peces, también se necesitan más estudios, pero en larvas, ya que en la literatura menciona que en esa etapa del desarrollo es donde dependen de los nutrientes del agua y de los productores primarios (Lazo, 2000). Respecto a los moluscos se esperaba que fuera lo contrario, ya que anteriormente se comentó que en la comunidad de peces no había información suficiente para relacionarlos con estas variables, por lo que es necesario realizar más estudios. Los bivalvos al ser filtradores están íntimamente ligados al nitrato al ser parte de su alimentación, prefieren agua con alto contenido de nitrógeno en forma de nitrato (Gosling, 2004), por lo que hacen falta estudios para demostrar la relación de la fauna con estos dos nutrientes.

Relaciones de variables.

En el medio natural no existen divisiones espaciales (Levin, 1989), se partió de la idea de que podría haber características diferentes en zonas del Caribe mexicano. Para asegurar que existe una división del centro y norte, escala propuesta en este trabajo, se debe analizar con respecto al tiempo. En este trabajo se encontraron diferencias a escalas de sitio y localidad, que si bien son conceptos no naturales, resultaron exitosos para describir cambios en la comunidad de peces y moluscos. También es importante mencionar que se identificaron localidades o bien, áreas con características desfavorables para especies sensibles a cambios como los corales. El claro ejemplo se muestra en la relación inversa que hay de la diversidad de moluscos con la calidad del agua, este trabajo podría ser un antecedente de que podría estar cambiando la condición del Caribe mexicano y deja claro

que se necesitan mecanismos y acciones para, si bien no regresar la condición de hace unos años, si mantener las condiciones actuales. Finalmente es una contribución al conocimiento de la biodiversidad, parte muy importante para la conservación de especies, de áreas naturales protegidas y en general del equilibrio ecológico. “Cada organismo es un observador del medio ambiente y las adaptaciones de la historia de vida, tales como la escala y la dominancia” (Levin, 1989).

Conclusiones.

En este trabajo se logró caracterizar la fauna asociada a arrecifes de coral, de peces se registraron 85 especies y de moluscos 66 especies, adicionalmente se identificaron 25 especies de corales y 46 de algas. Como parte de la caracterización se observó que las familias Fissurellidae y Arcidae para moluscos y las familias Haemulidae, Pomacentridae y Scaridae para peces son frecuentes en el Caribe mexicano; sin embargo, familias con un interés particular por su alto porcentaje de herbivoría como las familias Scaridae y Acanthuridae tuvieron poco porcentaje de contribución. Las especies con mayor abundancia fueron para peces *T. bifasciatum* para peces y las especies del género *Cerithium* para moluscos, estas especies están relacionados con ambientes degradados, siendo la primera un posible indicador de ambientes degradados. La especie *Lutjanus jocu* y catorce especies de moluscos son nuevos registros para el centro y norte del Caribe mexicano, con base en la literatura y las bases de datos consultadas.

Una propiedad importante de la comunidad como lo es la diversidad taxonómica y la diversidad de Shannon-Weaver fue diferente en peces y moluscos, en los peces no cambio la diversidad ya en todas las localidades fue alta, por otro lado, la diversidad de moluscos presentó una tendencia a disminuir al norte del Caribe mexicano; el centro conformado por Tulum y Akumal tienen mayor diversidad que el norte o bien, Playa del Carmen y Punta Nizuc.

La cobertura bentónica constó de seis grupos funcionales, siendo la roca coralina el grupo dominante. En cuanto a los corales, Tulum tiene el mayor porcentaje de corales, y se observó que las coberturas de corales disminuyen hacia el norte, mientras que las macroalgas aumentan en el mismo sentido. Además, los géneros de corales constructores son menos abundantes en el norte del Caribe mexicano.

Se midieron los nutrientes de la columna de agua de las costas del centro y norte del Caribe mexicano, con el fin de obtener el valor de calidad de agua TRIX. Se observó que las localidades del centro presentan una condición mesotrófica o mala, mientras que los del norte tienen una condición eutrófica o pobre. La clorofila *a* tuvo concentraciones altas al igual que los nitratos principalmente en el norte del Caribe mexicano. Los nutrientes medidos en este trabajo pueden estar relacionados con factores como las descargas de agua subterránea del continente, la densidad poblacional, las descargas de agua ilegal al acuífero y la influencia de estuarios. La calidad del agua no influyó en la comunidad de

peces, pero si influyó en la comunidad de moluscos, refiriéndose a su diversidad; además que los moluscos, particularmente los bivalvos tuvieron una relación directa con el nitrato.

Si bien la metodología de transectos mostró suficientes evidencias para diferenciar las tasas, en futuros trabajos podrían mostrar mejores resultados ampliando el esfuerzo de muestreo. Para moluscos revisión de sustrato (arena y roca coralina) y para peces con censos más amplios, además de artes de pesca para peces crípticos, juveniles, nocturnos.

La escala de áreas centro y norte tuvo una buena respuesta al mostrar cambios a través de la distancia con la metodología utilizada. Se obtuvieron características diferentes en centro y en norte del Caribe mexicano, por lo que podría resultar importante realizar más estudios e incluso proponer al centro del Caribe mexicano como una potencial Área Natural Protegida.

Con las propiedades ecológicas de la fauna, como riqueza, abundancia, diversidad y especies clave, sumando las condiciones de la calidad del agua, densidad poblacional, descargas de agua al acuífero y los porcentajes del bentos, principalmente algas y corales se determinó el estado de condición de las localidades. Las localidades con menor estado de perturbación fueron Akumal y Tulum. Las localidades más perturbadas son Playa del Carmen y Punta Nizuc, y para Playa del Carmen son los primeros registros de la fauna, calidad del agua y características del bentos. Punta Nizuc ha decrecido su condición por su aumento de macroalgas y pérdida de cobertura de corales, sumando su mala calidad de agua posiblemente derivada del mal saneamiento y el turismo. Debido a las condiciones del centro del Caribe mexicano, se podría proponer poner especial atención en estas localidades, con el fin de mantener las condiciones actuales y se resalta la importancia de este tipo de estudios para conocer la biodiversidad, ya que el cambio en la diversidad y la abundancia de especies, la pérdida de algunas y el aumento de otras puede cambiar el funcionamiento del ecosistema.

Bibliografía

- Abott, T. R. (1974) American Seashells. The marine Mollusca of the Atlantic and Pacific Coast of North America. Van Nostrand Reinhold Company. Canada. 663.
- Acero P. A., Garzón-Ferreira J. (1991) Meros, chernas y cabrillas del caribe colombiano (Pisces: Serranidae: Epinephelinae: Epinephelini). *Caldasia* 16(78), 355-375.
- Acosta G. G. (2013) Predicción espacial de áreas estables en arrecifes costeros del Caribe Mexicano: Factor Biodiversidad. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Aguayo C. J. E., Bello M. R., del Vecchio C. M. A., Araujo J. M., Basañez L. M. A. (1980) Estudio sedimentológico en el área de Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Bol. Soc. Geol. Mexic.* Tomo XLI 1 y 2, 15-32.
- Agudo-Adriani EA, Cappelletto J, Cavada-Blanco F and Cróquer A (2019) Structural Complexity and Benthic Cover Explain Reef-Scale Variability of Fish Assemblages in Los Roques National Park, Venezuela. *Front. Mar. Sci.* 6, 690. doi: 10.3389/fmars.2019.00690
- Aguilar-Estrada L. G., Ortigosa D., Urbano B., Reguero M. (2014) Análisis histórico de los gasterópodos de la laguna arrecifal de Isla Verde, Veracruz, México. *Rev. Mex. Bio.* 85, 502-512.
- AIDA (2014) La Protección de los Arrecifes de Coral en México. Rescatando la Biodiversidad Marina y sus Beneficios para la Humanidad. Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente.
- Albrighta R., Masona B., Millerb M., Langdona Cr. (2010) Ocean acidification compromises recruitment success of the threatened Caribbean coral *Acropora palmata*. *PNAS*, 107(47), 20400–20404.
- Almada V. P. C., Sale P. F., Gold-Bouchot G., Kjerfve B. (2003) Manual de métodos para el programa de monitoreo sinóptico del sam. Proyecto para el Sistema Arrecifal Mesoamericano, Belice.
- Álvarez-Sánchez L. F. (2006) Estructura comunitaria de moluscos (Clases: Bivalvia, Gastropoda scaphopoda). Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aranda C. N. (2004) Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical. Tesis de Doctorado, Universidad de Barcelona.

- Aminot A., Rey F. (2000) Standard procedure for the determination of chlorophyll a by spectroscopic methods. International Council for the Exploration of the Sea. ICES Techniques in Marine Environmental Sciences, Denmark.
- Anderson M.J., Gorley R.N., Clarke K.R. (2008) PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E: Plymouth, UK.
- Ardisson, P. L., D. Castillo Fernández. (1997) Diversidad bentónica de la laguna Celestún, Yucatán. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida. Informe final SNIBCONABIO proyecto No. B012. México D. F.
- Ardisson P. L., May-Kú M. A., Herrera-Dorantes M. T., Guillermo A. A. (2012) El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261-280.
- Argüelles Gonzáles A. L. M. (1999) Efecto de la herbivoría de peces sobre la dinámica de macroalgas de la Laguna de Chankanaab, Cozumel. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arias-González J. E. Rodríguez-Zaragoza F. A. y Legendre P. (2011) Reefscape proxies for the conservation of Caribbean coral reef biodiversity. *Cies. Mar.* 37(1), 87–96.
- Arias-González J. E, Fung T, Seymour R. M, Garza-Pérez J. R, Acosta-González G, Bozec Y. M. (2017) A coral-algal phase shift in Mesoamerica not driven by changes in herbivorous fish abundance. *PLoS ONE* 12(4), e0174855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174855>
- Aurelio Da Silva I., Batalha M. A. (2006) Taxonomic distinctness and diversity of a hyperseasonal savanna in central Brazil. *Diversity Distrib.* 12: 725–730.
- Baker D. M., Rodríguez-Martínez R. E., Fogel M. L. (2012) Tourism's nitrogen footprint on a Mesoamerican coral reef. *Coral Reefs* 32, 691-699. DOI 10.1007/s00338-013-1040-2
- Barajas P. J. J. (2009) Estructura comunitaria de componentes arrecifales en dos parques nacionales y su uso como indicador en cuestiones de manejo y conservación. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barjau G. E. (2012) Estructura comunitaria y diversidad taxonómica de los peces en la bahía de La Paz y San José, Golfo de California. Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C.

- Basurto-Lozano D. (2001) Estructura de un ensamble de peces arrecifales y conducta de peces Damisela (Pisces: Pomacentriidae) en el arrecife Ixlaché de Isla Contoy, Quintana Roo, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bautista F., Duarte Y. A., Batllori E. 2011. Amenazas, vulnerabilidad y riesgo de las aguas subterráneas en la Península de Yucatán. *Teoría y praxis*, 7(9), 9-31.
- Baums I. B., Miller M. W., Szmant A. M. (2003) Ecology of a corallivorous gastropod, *Coralliophila abbreviata*, on two scleractinian hosts. I: Population structure of snails and corals. *Mar. Bio.*142, 1083–1091. DOI 10.1007/s00227-003-1024-9
- Bernal A. G. (2018) Comparación de la diversidad y complejidad estructural de dos arrecifes de coral: La Perla del Golfo, Veracruz y Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bouchet, P., J. P. Rocroi. 2005. Classification and Nomenclator of Gasteropod families. *Malacologia* 47(1-2),1-84.
- Bouchet, P., J. P. Rocroi. 2010. Nomenclator of bivalve families. *Malacologia* 52, 1-84.
- Brown B. E.; Clarke K. R., Warwick. (2002) Serial patterns of biodiversity change in corals across shallow reef flats in Ko Phuket, Thailand, due to the effects of local (sedimentation) and regional (climatic) perturbations. *Mar. Bio.* 141, 21–29. DOI 10.1007/s00227-002-0810-0,
- Brusca Richard C., Gary J. Brusca. (2005) Invertebrados. McGraw Hill Interamericana.
- Burgos-Legorreta M. A. (1992) Lista comentada de los peces de Puerto Morelos. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Burke L., Maidens J. (2005) Arrecifes en Peligro en el Caribe. Ed. World Resources Institute, Estados Unidos de América.
- Buss L. W., Jackson J. B. C. (1979) Competitive networks: nontransitive competitive relationships in cryptic coral reef environments. *Am. Nat.* 113(2), 223-234.
- Canizales F. H. M. (2017) Efecto de los pastos marinos sobre las macroalgas rizofíticas en la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Capetillo P. N. (2016) Cambios en la diversidad de la malacofauna del Golfo de Batabanó, Cuba: su relación con factores antrópicos y naturales. Tesis de

Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.

- Carrillo-García D. M. (2018) Indicadores para monitorear la integridad ecológica de los arrecifes de coral: el caso del Caribe mexicano. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castillo-Rodríguez Z. G. (2014) Biodiversidad de moluscos de México. *Rev. Mex. Bio. Supl.* 85, 419-430.
- Castro S. C., Monroy L. M., Solano O. D. (2006) estructura de la comunidad epifaunal asociada a colonias de vida libre del hidrocoral *Millepora alcicornis* Linnaeus 1758 en Bahía Portete, Caribe colombiano. *Biol. Invest. Mar. Cost.* 35, 195-206. ISSN 0122-9761
- Cattuthers T. J. B; van Tussenbroek B. I., Dennison W. C. (2005) Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 64, 191-199.
- Cervantes-Martínez A., Guitiérrez-Aguirre M. A., Álvarez-Legorreta T. (2014) Indicadores de calidad del agua en lagunas insulares costeras con influencia turística: Cozumel e Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, 10, núm. especial: 60-83 p, ISSN 1870-1582.
- Cetz-Navarro, N. P., J. Espinoza-Avalos, A. Senties-Granados, L. I. Quan-Young. (2008) Nuevos registros de macroalgas para el Atlántico mexicano y riqueza florística del Caribe mexicano. *Hidrobiológica* 18, 11-19.
- Chávez-Hidalgo A. (2009) Conectividad de los arrecifes coralinos del Golfo de México y Caribe mexicano. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional.
- CONAGUA (2017) Estadísticas del agua en México. Edi. 2017, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua, 294.
- Colás-Marrufo T., Tuz S. A., Brule T. (2002) Observaciones Preliminares sobre la Pesquería de Meros (Serranidae: Epinephelunae) en el Parque Marino Nacional "Arrecife Alacranes", Yucatán, México. 53rd Gulf and Caribbean Fisheries Institute, 431-445.
- Coral C. E. E., Campos C. B. L. (2013) Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México. Universidad de Quintana Roo. SECTUR.
- De la Cruz T. J., Martínez P. J. A., Bandillo A. M., Del Moral F. L. F., Fracno L. J., Chiappa C. X. (2016) Familias de peces osos de golfo de México, clave ilustrada y

descripción. Primera edición, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Sisal; SIIES.

- Del Mónaco C., E. Villamizar E., S. Narciso. (2008) Tasa de depredación de *Coralliophila abbreviata* (Neogastropoda: Coralliophilidae) sobre algunas especies coralinas del Parque Nacional Morrocoy, Venezuela. *Rev. Biol. Trop.* (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) 56 (Suppl. 1), 235-246.
- Delgado J. J. A., Sudre A. J., Tanahara S. S., Montes I., Hernández-Ayón J. M., Zirino A. (2019) Effect of Caribbean Water incursion into the Gulf of Mexico derived from absolute dynamic topography, satellite data, and remotely sensed chlorophyll *a*. *Ocean Sci.*, 15, 1561–1578. <https://doi.org/10.5194/os-15-1561-2019>.
- Delgado-Pech B. (2016) Comunidades de macroalgas en arrecifes coralinos de Quintana Roo: composición taxonómica y patrones de colonización. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán CICY.
- Díaz-Ruiz, S., A. Aguirre-León, M. Gazca-Castro, (2019) Biodiversidad de los Peces en el Sistema Arrecifal Mesoamericano. Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos. Universidad Autónoma de Campeche. *Red ricomar.*, 334. isbn 978-607-8444-57-1. doi: 10.26359/epomex.0519
- Dibiccari J. L., LEE D., O'Donnell D. R., Raines C. R. (2010) The effect of disturbance on top-down control of epiphytic diatom communities by the snail, *Cerithium litteratum*. *Dartmouth Stud. in Trop. Eco*, 101-104.
- Domínguez-Domínguez O., G. Palacios Morales, F. Martínez Servín, Y. M. López Arroyo, A. L. Moreno Vázquez, J. A. Sánchez Jiménez, A. T. Arredondo Chávez, J. A. Caballero Vázquez (2015) Informe final del proyecto lh003 “inventario ictiofaunístico de los humedales de puerto morelos, quintana roo”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Biología, Laboratorio de Biología Acuática.
- Dustan, P. (1977) Vitality of reef coral populations off Key Largo, Florida: Recruitment and mortality. *Env./ Geo.*, 2(1), 51–58. doi:10.1007/bf02430665
- FishBase (1999) FishBase 99 CD-ROM. ICLARM, Manila.
- Gallardo T. A., Bandillo A. M., Rivera F. V., Rubio M. J., Galindo S. C., Loera P. J., García G. T., Chiappa C. X. (2014) Catálogo de peces de la costa norte de Yucatán. Consejo de Ciencia, Innovación y Tecnología del Estado de Yucatán, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Sisal.

- García-Cubas, A, M. Reguero (2004) Catálogo ilustrado de Moluscos Bivalvos del Golfo de México y Mar Caribe. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- García-Hernández V. M. (2001) Composición y distribución espacio-temporal de los peces de la Laguna Pajarera Central, Isla Contoy, Quintana Roo. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Hernández V. C., Reyes-Bonilla H., Balartm E. F., Ríos-Jara E., E. Lluch-Cota S., Serviere-Zaragoza E. (2014) Comparison of ecological diversity and species composition of macroalgae, benthic macroinvertebrates, and fish assemblages between two tropical rocky reefs. *Rev. Biol. Mar. Ocean.* 49(3), 477-491.
- Garza-Pérez JR, Mata-Lara M, García-Guzmán S., Schirp-García EA. (2010) Reporte de Caracterización y Evaluación de Estado de Condición Arrecifal. Akumal, Q. Roo. Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Sisal, PIESACOM.
- Gallegos M. M. E. (1994) Dinámica de poblaciones y crecimiento de los pastos marinos caribeños *Thalassia testudinum*, *Bankx ex König*, *Syringodium filiforme* *Kütz* y *Halodule wrightii* *Ascherson*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno del Estado de Quintana Roo (2011-2016) Programa Institucional de Población.
- Gosling, E. (2004) Bivalve Molluscs: Biology, Ecology and Culture. Fishing New Books. EU. 459.
- Van Moorsel G. W. N. M. (1985) Disturbance and growth of juvenile corals (*Agaricia humilis* and *Agaricia agaricites*, Scleractinia) in natural habitats on the reef of Curacao. *Mar. Eco. Prog. Ser.* 24, 99-112.
- González-Díaz S. P., González-Sansón G., Cubero Y. P., Cabrales Y., Fernández A. S. (2008) Estructura de las poblaciones de *Acropora palmata*, *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites* forma masiva (Cnidaria; Scleractinia) en el arrecife de Playa Baracoa, Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 29(3), 213-223.
- Graham J. Edgar., Timothy J. Alexander., Jonathan S. Lefcheck., y Amanda E. Bates. (2017) Abundance and local-scale processes contribute to multiphyta gradients in global marine diversity. *Scien. Adv.* 1-12.

- Guerra-Castro, E. J. (2012) Diversidad de especies, patrones y procesos estructurales de las comunidades incrustantes asociadas a las raíces de mangle rojo *Rhizophora Mangle L.* Tesis de Doctorado, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas.
- Guevara-Muños M. D. (1998) Análisis de la estructura comunitaria de los peces arrecifales del parque marino Chankanaab, Cozumel, Quintana Roo. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. 60.
- Henriksen, A. (1996) An automatic method for determining orthophosphate in sewage and highly polluted waters. *Analyst.* 91, 652
- Hernández-Delgado E.A., Sandoz B., Bonkosky M., Norat-Ramírez J., Mattei H. (2008) Impacts of non-point source sewage pollution on Elkhorn coral, *Acropora palmata* (Lamarck), assemblages of the southwestern Puerto Rico shelf. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida. Session number 18, 747-751.
- Hernández-Terrones L., Rebolledo-Vieyra M., Merino-Ibarra M., Melina S., Le-Cossec A., Monroy-Ríos E. (2011) Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Wat Air Soil Poll* 218, 517–528.
- Hernández-Terrones L. M., Null A. K., Ortega-Camacho D., Paytan A. (2015) Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Cont. Shelf Res.* 102, 62–72.
- Hernández R. y Álvarez F. (2019) Molluscs from the Puerto Morelos Reef National Park, Quintana Roo, Mexico; new records for the Mexican Caribbean. *Rev. Mex. Bio.* 90, e902712. 14.
- Hernández-Padilla H. (2014) Diversidad taxonómica de gastropodos (Mollusca: Gastropoda) en la planicie arrecifal de Isla de Enmedio, Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Herrera-Silveira J. A., Comín S. F. A., Capurro F. L. (2005) Los usos y abusos de la zona costera en la península de Yucatán. Universidad Autónoma de Campeche. Cap. 26, 387-396
- Herrera-Silveira, J. A., Cortés Balán, T. O., Ramírez-Ramírez, J., I. Osorio (2015) Monitoreo de la condición trófica de la columna de agua de los ambientes costeros del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc:

segunda Etapa. Proyecto Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida. Informe final SNIBCONABIO, proyecto No. GQ002, México D.F.

- HOWARTH, R., (2000) Nutrient pollution of coastal rivers, bays, and seas. *Issues Ecol.* 7, 1-15.
- Humann N. P (2002) Reef Fish Identification. Third edition. New World Publications, Inc. USA, 487 pp.
- INEGI (2002) Estudio hidrológico del Estado de Quintana Roo.
- INEGI (2010) Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IUCN (2020) The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-2. <https://www.iucnredlist.org>. Downloaded on 09 July 2020.
- Jordán, D. E., de la Torre, R., M. Angot. (1978) Prospección biológica de la Laguna de Nichupté, Cancún, Q. R., México: nota científica. Anuario del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. PAG
- Malacolog 4.1.1: Rosenberg, G. (1993). A database approach to studies of molluscan taxonomy, biogeography and diversity, with examples from Western Atlantic marine gastropods. *American Malacological Bulletin* 10:257-266.
- Margalef, R. (1974) Ecología. Ed. Omega.
- Martínez-Ramírez O. (2005) Evaluación del asentamiento de estadios tempranos de peces en colectores flotantes tipo GuSi, en la región de Santa Marta, Caribe Colombiano. Tesis de Licenciatura, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Biología Marina.
- Mata-Lara M., J.R. Garza-Pérez, P. Salles A. A. (2016) Camino a la Resiliencia: Monitoreo Socioeconómico de Akumal, Q. Roo. LANRESC, Yucatán, México.
- Melanie McField, Patricia Kramer, Ana Giró Petersen, Mélina Soto, Ian Drysdale, Nicole Craig, Marisol Rueda Flores. (2020). 2020 Mesoamerican Reef Report Card.
- Nelson, J. S. 2006. *Fishes of the World*. 4a ed. John Wiley & Sons, Nueva York. 601.
- Micheli F., Mumby P. J., Brumbaugh D. R., Broad K., Dahlgren C. P., Harborne R. A., Holmes E. K., Kappel V. C., Litvin Y. S., Sanchirico N. J. (2014) High vulnerability of ecosystem function and services to diversity loss in Caribbean coral reefs. *Elsevier Bio. Cons.* 171, 186-194.
- Miloslavich P, Díaz JM, Klein E, Alvarado JJ, Díaz C, *et al.* (2010) Marine Biodiversity in the Caribbean: Regional Estimates and Distribution Patterns. *PLoS ONE* 5(8), e11916. doi:10.1371/journal.pone.0011916

- Molina-Hernández A. L. (2016) Estructura comunitaria de peces arrecifales y su relación con el hábitat de Akumal, Quintana Roo. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moreno E. C. (2001) Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, 1. Zaragoza.
- Morillo-Velarde P. S, Briones-Fourzán P., Álvarez-Filip L, Aguíñiga-García S., Sánchez-González A., Lozano-Álvarez E. (2018) Habitat degradation alters trophic pathways but not food chain length on shallow Caribbean coral reefs. *Scie. Rept.* 8, 4109. 1-12p. DOI:10.1038/s41598-018-22463-x 1
- Nagelkerken I., M Dorenbosch, W. C. E. P. Verberk, E. Cocheret de la Moriniere, G. van der velde. (2000) Day-night shifts of fishes between shallow-water biotopes of a Caribbean bay, with emphasis on the nocturnal feeding of Haemulidae and Lutjanidae. *Mar. Eco. Pro. Ser.* 194, 55-64.
- Naturalista, CONABIO <http://www.naturalista.mx> Acceso 27 de febrero de 2018
- NMX-AA-099-SCFI-(2006) Análisis de agua. Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales- Métodos de prueba. Secretaría de Economía. México.
- Null, K. A., K. L. Knee, E. D. Crook, N. R. de Sieyes, M. Rebolledo-Vieyra, L. Hernández-Terrones, A. Paytan (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Cont. Shelf Res.* 77, 38-50.
- Núñez-Lara E., Arias-González J. E. (1998) Composición, biomasa y estructura trófica de comunidad de peces arrecifales en tres áreas del sur del Caribe mexicano. *GCFI*, 1004-1021.
- Lang J. C., Marks K. W., Kramer P. R., Kramer P. A., Ginsburg R. N. (2012) Protocolos AGRRA versión 5.5
- Lara-Domínguez, A. L. (2005) Manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal. Instituto de Ecología/Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Xalapa, Ver. México, 1266.
- Lazo J. P. (2000). Conocimiento actual y nuevas perspectivas en el desarrollo de dietas para larvas de peces marinos. In: Cruz -Suárez, L.E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Olvera-Novoa, M.A., Civera-Cerecedo, R., (Eds.). Avances en Nutrición Acuícola V. Memorias del V Simposium Internacional de Nutrición Acuícola, 19-22

- Lorenzen C. J. (1967) Determination of Chlorophyll and Pheo-Pigments: Spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanog.* 12(2), 343-346.
- Lozano-Álvarez, E., D. Guevara-Muñoz, P. Briones-Fourzán (2007) La comunidad de peces arrecifales del Parque Chankanaab. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés, ISBN-978-968-7864-95-2.
- Odum P. E. (1972) Ecología. Ed. Interamericana. México D.F.
- Olaya-Restrepo J., Reyes-Nivia M. C., Rodríguez-Ramírez A. (2008) Ensamblajes de peces arrecifales del área de santa marta y el parque nacional natural tayrona. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 37(1), 111-127. ISSN 0122-9761
- Orrell T (2020): nmnh_material_sample. V1.18. National Museum of Natural History, Smithsonian Institution. Dataset/Occurrence. https://collections.nmnh.si.edu/ipr/resource?r=nmnh_material_sample&v=1.18
- Parsons, T.R., Y. Maita, C.M. Lalli. (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Elmsford, N.Y.
- Pérez R. G. (1999) Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Revista Acad. Colomb. Ci. Exact.* 23(88), 375-386.
- Pérez-Rodríguez R. (1980) Moluscos de plataforma continental del Golfo de México y Caribe Mexicano. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Santos I., Schneider W., Valle-Levinson A., Garcés-Vargas J, Soto I., Montoya-Sánchez R., González N. M., Müller-Karger F. (2014) Chlorophyll-a patterns and mixing processes in the Yucatan Basin, Caribbean Sea. *Cien. Mar.* 40(1), 11–31.
- Pinet R. P. (2009) Invitation to Oceanography. Jones and Bartlett Publishers. Canadá.
- Prieto A., Sant S., Méndez E., Lodeiros C. (2002) Diversidad y abundancia de moluscos en las praderas de *Thalassia testudinum* de la Bahía de Mochima, Parque Nacional Mochima, Venezuela. *Rev. Biol. Trop.* 51(2), 413-426.
- Robins R. C. (1991) Regional diversity among Caribbean fish species. Oxford University Press and American Institute of Biological Sciences, 458-459.
- Rocha, R. A., A., L. A. Chávez., R. A. Ramírez, O. S. Cházaro. (2012) Comunidades. Métodos de estudio. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala.

- Romero-Sierra P., Almazán-Becerril A., Hernández-Terrones L. (2018) Hydrochemistry and hydrodynamics of a Mexican Caribbean Lagoon: Nichupté Lagoon System. *Estu. Coas. Shelf Scie.* 215, 185–198.
- Roy E. R. (2004) Akumal's reefs: Stony coral communities along the developing Mexican Caribbean coastline. *Rev. Biol. Trop.* 52(4), 869-881.
- Rueda-Roa D. T. y Muller-Karger F. E., (2012) The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep-Sea Resea.* 178, 102–114.
- Sánchez A., Anguas-Cabrera D., Camacho-Cruz K., Ortiz-Hernández Ma. Concepción, Aguiñiga-García S. (2018) Spatial and temporal variation of the d15N in *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean (2009–2017). *Mar. Freshwater Res., Jour. Comp. CSIRO* 2020. A-H p.
- Sánchez-Villalobos M. (2014) Bases de datos de moluscos presentes en la colección biológica de la Secretaría de Marina-Armada de México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salazar-Vallejo, Sergio I. (2002). Huracanes y biodiversidad costera tropical. *Rev. Bio. Tro.* 50(2), 415-428.
- SEMARNAT (2016) Programa de Manejo Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres Punta Cancún y Punta Nizuc. Primera edición, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Natural de Áreas Naturales Protegidas.
- Schmitter-Soto J. J; Vásquez-Yeomans L; Aguilar-Perera, A; Curiel-Mondragón C., Caballero-Vázquez J. A. (2000) Lista de peces marinos del Caribe mexicano. *Anales del Instituto de Biología. Serie Zoología*, 71, 143-177.
- Short F. T. L. J., Coles R. G., Vilder K. P., Gaekle J. L. (2006) Seagrassnet Manual or Scientific Monitoring or Seagrass Habitat. Worldwide edition. University of New Hampshire Publication.
- Silvern S., Young S. (2013) Environmental change and sustainability. *ItechOpen, Web of Scien*, 36-38.
- Segrado P. R. G., Arroyo A. L., Amador S. K. (2010) La zonificación y su aplicación en las Áreas Naturales Protegidas de uso Turístico de Quintana Roo. México. *El periplo sustentable*, 19, 69-91.
- Signoret M., Bulit C., Pérez R. (1998) Patrones de distribución de clorofila a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica* 8(2), 81-88.

- Solorzano, L. (1969) Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.* 14, 799.
- Standard Methods for the examination of Water and Wastewater (1975) 14th edition, p 427.
- Suárez-Mozo N. Y. (2016) Taxonomía y aspectos ecológicos de los moluscos de profundidad en la costa oeste de baja california. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Suchley, A., McField, M.D., Alvarez-Filip, L., (2016). Rapidly increasing macroalgal cover not related to herbivorous fishes on Mesoamerican reefs. *PeerJ* 4, e2084.
- Torres Díaz, María Concepción, Basulto Solis, Yanet Yahaira, Cortés Esquivel, Jorge, García Uitz, Karla, Koh Sosa, Ángel, Puerto Romero, Franklin, Pacheco Ávila, Julia Guadalupe. (2014) Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosis. Recur. Agropecua.* 1(3), 189-203.
- Trujillo, P. A., V. H. Thurman. (2011) Essentials of Oceanography. Tenth edition. Person.
- Tunnell, J. W., J. Andrews, N. C. Barrera, F. Moretzsohn (2010) Encyclopedia of Texas seashells: identification, ecology, distribution, and history. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies Series, Kindle Edition Edition. FCI Print group.
- Tunnell Jr, J. W., E. A. Chávez., K. Withers. (2007) Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies Series. Estados Unidos de América.
- Underwood A. J., Chapman M. G., Connell S. D. (2000) Observations in ecology: you can't make progress on processes without understanding the patterns. *Jour. Exper. Mar. Bio. Eco.* 250, 97-115
- U.S. Environmental Protection Agency (1971) Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Method 352.1. US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency (1979) Methods for Chemical Analysis of Water and wastes. EPA-600/4-79-020, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio.
- Van der Spoel S. (1994) A biosystematic basis for pelagic biodiversity. *Bijdr Dierk* 64, 3-31.

- Vascetta M., Kayppila P., Furman E. (2008) Aggregate Indicators in Coastal Policy Making: Potentials of the Trophic Index TRIX for Sustainable Considerations of Eutrophication. *Sust. Dev.* 16, 282–289 p. DOI: 10.1002/sd.379
- Vázquez-Yeomans, L., M. A. González-Vera. (1992) Peces marinos de las costas de Quintana Roo: un listado preliminar. Centro de Investigaciones de Quintana Roo, Chetumal, 2, 361-373.
- Verhoef A. H., Morin J. P. (2010) Community Ecology Processes, Models, and Applications. Ed. Oxford University Press. Primera edición. E.U.
- Villanueva-Sousa V. (2011) Análisis del talud, zona norte, del Arrecife Sacrificios con base en la distribución de moluscos y equinodermos. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- R. M. Warwick, K. R. Clarke (1995) New 'biodiversity' measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 129, 301-305.
- R. M. Warwick, K. R. Clarke R. M. (1998) Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Jour. Appli. Ecol.* 35, 532-543.
- R. M. Warwick, K. R. Clarke R. M. (2001) Practical measures marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceano. Biol. Mar.: an Annual Review*, 39, 207-231.
- R. M. Warwick, K. R. Clarke R. M. (2002) Death assemblages of molluscs on St Martin's Flats, Isles of Scilly: a surrogate for regional biodiversity?. *Biodi. Conser.* 11, 99-112.
- Ward E. J., MacDonald A. B. (1996) Pre-ingestive feeding behaviors of two subtropical bivalves (*Pinctada imbricata* and *Arca zebra*): responses to an acute increase in suspended sediment concentration. *Bulletin of Mar. Science.* 59(2), 417-432.
- Whittaker, R.J., K. J. Willis, R. Field (2001) Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity. *J. Biogeogr.*, 28, 453-470.
- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan. M. Padilla (2009) Ecorregiones marinas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal.
- Witman D. J., Kaustuv R. (2009) Marine macroecology. The University of Chicago Press, Chicago.
- WoRMS Editorial Board (2020). World Register of Marine Species. Available from <http://www.marinespecies.org> at VLIZ. Accessed 2020-01-07. doi:10.14284/170

- Zieman C. J. (1982). The ecology of the seagrasses of south Florida: a community profile. U.S. Fish and wildlife Service, Office of Biological Service, Washington, D.C. FWS/OBS-82/25.158

Anexos 1. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

Coordenadas	Geográficas		UTM Zone 16	
	Norte	Este	Norte	Este
Tulum 1	21°14'54.7"	087°23'42.25"	458738.56	2239034.19
Tulum 2	20°10'31"	087°26'25.7"	453973	2230939.85
Tulum 3	20°13'08.5"	087°25'10.29"	456176.14	2235777.01
Tulum 4	20°12'21.06"	087°25'29.7"	455606.85	2234318.06
Tulum 5	20° 11' 54.42"	87° 25' 46.1"	455130.85	2233500.15
Tulum 6	20°08'39.3"	087°27'22.8"	452306.03	2227511.07
Tulum 7	20°07' 46"	087°27'41.8"	451750.68	2225873.96
Akumal 1	20° 21' 42.9"	87° 19' 51.6 "	465454.1	2251567.97
Akumal 2	20° 21' 44.8 "	87° 19' 51.6"	465454.53	2251625.33
Akumal 3	20° 21' 42.94 "	87° 19' 51.64"	465562.66	225179.2
Akumal 4	20° 21' 52.42"	87° 19' 37.4"	465867.45	2251858.63
Akumal 5	20° 22' 05.65"	87° 19' 37.9"	465852	2252265.3
Akumal 6	20° 22' 20.9"	87° 19' 26.69"	466179.67	2252734.73
Playa 1	20° 36' 52.92"	87° 03' 54.64"	493208.77	2279508.01
Playa 2	20° 37' 43.33"	87° 02' 45.30"	495216.11	2281056.96
Playa 3	20° 38' 36.35"	87° 01' 45.88"	496936.08	2282686.29
Nizuc 1	21° 01' 25.66"	86° 46' 36.95"	523179.58	2324797.58
Nizuc 2	21° 00' 08.11"	86° 47' 36.36"	521467.86	2322411.12
Nizuc 3	21° 01' 15.47"	86° 47' 10.17"	522220.97	2324482.81

ANEXO 2. Concentración de nutrientes expresados en micromol.

Localidad	Clorofila μM	μM N-NO2 -/L	μM N-NO3 -/L	μM N-NH4 +/L	μM PO4 -3/L
Tulum_01	1.7	0.163026	11.048	0.3646	0.1087
Tulum_02	0.44	0.588997	11.453	0.0435	0.1087
Tulum_03	0.44	0.163026	7.61	0.0435	0.1087
Tulum_04	0.44	0.124463	4.347	0.0435	0.1087
Tulum_05	0.44	0.163026	4.347	0.0435	0.1087
Tulum_06	0.44	0.952546	4.98	0.0435	0.1904
Tulum_07	0.44	6.526957	17.824	1.1853	1.9674
Akumal_01	0.99	0.548603	11.048	0.0435	0.1087
Akumal_02	0.44	0.669786	11.453	0.0435	0.1087
Akumal_03	0.44	0.163026	7.61	1.0139	3.3954
Akumal_04	0.44	0.163026	4.347	1.2664	3.9666
Akumal_05	0.44	0.163026	4.347	5.8749	0.476
Akumal_06	0.44	0.163026	4.98	0.0129	0.7298
Playa_01	1.7	0.952546	11.25	0.8606	0.1087
Playa_02	0.29	0.588997	11.048	0.067	0.1087
Playa_03	45.7	1.235306	12.666	0.4818	10.8525
Nizuc_01	7.1	2.588514	13.273	0.0435	0.0952
Nizuc_02	29	0.528406	4.347	1.1763	2.5069
Nizuc_03	7.1	0.326435	11.756	0.3556	0.7298

ANEXO 3. Sistemática de corales.

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autor
Hydrozoa	Anthoathecata	Milleporidae	<i>Millepora</i>	<i>Millerpora alcicornis</i>	Linnaeus, 1758
Hydrozoa	Anthoathecata	Milleporidae	<i>Millepora</i>	<i>Millepora complanata</i>	Lamarck, 1816
Anthozoa	Scleractinia	Siderastreidae	<i>Siderastrea</i>	<i>Siderastrea siderastrea</i>	(Ellis & Solander, 1786)
Anthozoa	Scleractinia	Siderastreidae	<i>Siderastrea</i>	<i>Siderastrea radians</i>	(Pallas, 1766)
Anthozoa	Scleractinia	Astrocoeniidae	<i>Stephanocoenia</i>	<i>Stepannocoenia sp</i>	
Anthozoa	Scleractinia	Astrocoeniidae	<i>Stephanocoenia</i>	<i>Stepahnocoenia intercepta</i>	(Esper, 1795)
Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	<i>Porites</i>	<i>Porites astreoides</i>	Lamarck, 1816
Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	<i>Porites</i>	<i>Porites branneri</i>	Rathbun, 1888
Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	<i>Porites</i>	<i>Porites porites</i>	(Pallas, 1766)
Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	<i>Madracis</i>	<i>Madracis decactis</i>	(Lyman, 1859)
Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	<i>Madracis</i>	<i>Madracis pharensis</i>	(Heller, 1868)
Anthozoa	Scleractinia	Agariciidae	<i>Agaricia</i>	<i>Agaricia tenuifolia</i>	Dana, 1846
Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	<i>Acropora</i>	<i>Acropora sp</i>	
Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	<i>Acropora</i>	<i>Acropora palmata</i>	(Lamarck, 1816)
Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	<i>Acropora</i>	<i>Acropora cervicoides</i>	(Lamarck, 1816)
Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	<i>Mycetophyllia</i>	<i>Mycetophyllia ferox</i>	Wells, 1973
Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	<i>Pseudodiploria</i>	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	(Dana, 1846)
Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	<i>Diploria</i>	<i>Diploria laberytiformis</i>	(Linnaeus, 1758)
Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	<i>Pseudodiploria</i>	<i>Pseudodiploria clivosa</i>	Diploria clivosa
Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	<i>Manicina</i>	<i>Manicina areolata</i>	(Linnaeus, 1758)
Anthozoa	Scleractinia	Meandrinidae	<i>Eusmilia</i>	<i>Eusmilia fastigiata</i>	(Pallas, 1766)
Anthozoa	Scleractinia	Meandrinidae	<i>Meandrina</i>	<i>Meandrina meandrites</i>	(Linnaeus, 1758)
Anthozoa	Scleractinia	Meandrinidae	<i>Drendrogira</i>	<i>Drendrogira cylindrus</i>	(Ehrenberg, 1834)

Continuación

Anthozoa	Scleractinia	Merulinidae	<i>Orbicella</i>	<i>Orbicella annularis</i>	(Ellis & Solander, 1786)
Anthozoa	Alcyonacea	Plexauridae	<i>Pseudoplexaura</i>	<i>Pseudoplexaura</i> <i>a sp</i>	
Anthozoa	Alcyonacea			<i>Gorgonacea</i>	

ANEXO 4. Sistemática de especies de macroalgas del centro y norte de Quintana Roo.

Clase	Familia	Genero	Especie
Ulvophyceae	Caulerpaceae	<i>Caulerpa</i>	<i>Caulerpa verticillata</i>
Ulvophyceae	Caulerpaceae	<i>Caulerpa</i>	<i>Caulerpa sertularioides</i>
Ulvophyceae	Caulerpaceae	<i>Caulerpa</i>	<i>Caulerpa mexicana</i>
Ulvophyceae	Caulerpaceae	<i>Caulerpa</i>	<i>Caulerpa racemosa</i>
Ulvophyceae	Valoniaceae	<i>Ventricaria</i>	<i>Ventricaria ventricosa</i>
Ulvophyceae	Codiaceae	<i>Codium</i>	<i>Codium sp</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Udotea</i>	<i>Udotea cyathiformis</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Udotea</i>	<i>Udotea flabellum</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Udotea</i>	<i>Udotea occidentalis</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Udotea</i>	<i>Udotea wilsonii</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Rhipocephalus</i>	<i>Rhipocephalus phoenix</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Penicillus</i>	<i>Penicillus capitatus</i>
Ulvophyceae	Udoteaceae	<i>Penicillus</i>	<i>Penicillus dumetosus</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda lacrimosa</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda goreauii</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda capiosa</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda tuna</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda c.f. discoidea</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda incrassata</i>
Ulvophyceae	Halimedaceae	<i>Halimeda</i>	<i>Halimeda opuntia</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Canistrocarpus</i>	<i>Canistrocarpus cervicornis</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Dictyota</i>	<i>Dictyota c. f. divaricata</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Dictyota</i>	<i>Dictyota mertensii</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Dictyota</i>	<i>Dictyota c. f. jamaicensis</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Dictyota</i>	<i>Dictyota dichotoma</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Dictyopteris</i>	<i>Dictyopteris delicatula</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Stypopodium</i>	<i>Stypopodium zonale</i>
Phaeophyceae	Dictyotaceae	<i>Lobophora</i>	<i>Lobophora variegata</i>
Phaeophyceae	Sargassaceae	<i>Sargassum</i>	<i>Sargassum hystrix</i>
Phaeophyceae	Sargassaceae	<i>Turbinaria</i>	<i>Turbinaria turbinata</i>
Florideophyceae	Halymeniaceae	<i>Halymenia</i>	<i>Halymenia cf. duchassaingii</i>
Florideophyceae	Kellymeniaceae	<i>Kellymenia</i>	<i>Kellymenia limminghii</i>
Florideophyceae	Palmariaceae	<i>Ceramium</i>	<i>Ceramium sp</i>
Florideophyceae	Ceramiales	<i>Ceramium</i>	<i>Ceramium nitens</i>
Florideophyceae	Wrangeliaceae	<i>Wrangelia</i>	<i>Wrangelia argus</i>

Continuación

Florideophyceae	Dasyaceae	<i>Heterosiphonia</i>	<i>Heterosiphonia gibbsii</i>
Florideophyceae	Bonnemaisoniaceae	<i>Asparagopsis</i>	<i>Asparagopsis taxiformis</i>
Florideophyceae	Rhodomelaceae	<i>Chondria</i>	<i>Chondria sp</i>
Florideophyceae	Rhodomelaceae	<i>Acanthophora</i>	<i>Acanthophora spicifera</i>
Florideophyceae	Rhodomelaceae	<i>Bryothamnion</i>	<i>Bryothamnion triquetrum</i>
Florideophyceae	Galaxauracea	<i>Galaxaura</i>	<i>Galaxaura oblongata</i>
Florideophyceae	Lithophillaceae	<i>Amphiroa</i>	<i>Amphiroa fragilissima</i>
Florideophyceae	Lithophillaceae	<i>Amphiroa</i>	<i>Amphiroa tribulus</i>
Florideophyceae	Lithophillaceae	<i>Titanoderma</i>	<i>Titanoderma sp</i>
Florideophyceae	Peyssonneliaceae	<i>Peyssonnelia</i>	<i>Peyssonnelia sp</i>
Florideophyceae	Porolithaceae	<i>Porolithon</i>	<i>Porolithon sp</i>
Florideophyceae	Hydrolithaceae	<i>Hydrolithon</i>	<i>Hydrolithon sp</i>

ANEXO 5. Sistemática de peces del centro y norte de Quintana Roo.

Clase	Orden	Familias	Género	Especies	Autor
Elasmobranchii	Myliobatiformes	Urotrygonidae	Urobatis	<i>Urobatis jamaicensis</i>	(Cuvier, 1816)
Actinopterygii	Aulopiformes	Synodontidae	Synodus	<i>Synodus intermedius</i>	(Spix & Agassiz, 1829)
Actinopterygii	Beloniformes	Belonidae	Ablennes	<i>Ablennes hians</i>	(Valenciennes, 1846)
Actinopterygii	Beryciformes	Holocentridae	Holocentrus	<i>Holocentrus adscensionis</i>	(Osbeck, 1765)
Actinopterygii	Syngnathiformes	Aulostomidae	Aulostomus	<i>Aulostomus maculatus</i>	Valenciennes, 1841
Actinopterygii	Scorpaeniformes	Scorpaenidae	Scorpaena	<i>Scorpaena plumieri</i>	Bloch, 1789
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Serranus	<i>Serranus tigrinus</i>	(Bloch, 1790)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Cephalopholis	<i>Cephalopholis fulva</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Cephalopholis	<i>Cephalopholis cruentata</i>	(Lacepède, 1802)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Hypoplectrus	<i>Hypoplectrus nigricans</i>	(Poey, 1852)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Hypoplectrus	<i>Hypoplectrus puella</i>	(Cuvier, 1828)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Hypoplectrus	<i>Hypoplectrus indigo</i>	(Poey, 1851)
Actinopterygii	Perciformes	Serranidae	Mycteroperca	<i>Mycteroperca venenosa</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Grammatidae	Gramma	<i>Gramma loreto</i>	Poey, 1868
Actinopterygii	Perciformes	Carangidae	Caranx	<i>Caranx crysos</i>	(Mitchill, 1815)
Actinopterygii	Perciformes	Carangidae	Caranx	<i>Caranx ruber</i>	(Bloch, 1793)
Actinopterygii	Perciformes	Carangidae	Carangoides	<i>Carangoides bartholomaei</i>	(Cuvier, 1833)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus analis</i>	(Cuvier, 1828)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus apodus</i>	(Walbaum, 1792)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus mahogoni</i>	(Cuvier, 1828)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus griseus</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus jocu</i>	(Bloch & Schneider, 1801)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Lutjanus	<i>Lutjanus synagris</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Lutjanidae	Ocyurus	<i>Ocyurus chrysurus</i>	(Bloch, 1791)
Actinopterygii	Perciformes	Gerreidae	Gerres	<i>Gerres cinereus</i>	(Walbaum, 1792)

Continuación

Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Anisotremus	<i>Anisotremus surinamensis</i>	(Bloch, 1791)
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Anisotremus	<i>Anisotremus virginicus</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon sciurus</i>	(Shaw, 1803)
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon chrysargyreum</i>	Günther, 1859
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon flavolineatum</i>	(Desmarest, 1823)
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon macrostomum</i>	Günther, 1859
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon plumierii</i>	(Lacepède, 1801)
Actinopterygii	Perciformes	Haemulidae	Haemulon	<i>Haemulon carbonarium</i>	Poey, 1860
Actinopterygii	Perciformes	Sparidae	Calamus	<i>Calamus nodosus</i>	Randall & Caldwell, 1966
Actinopterygii	Perciformes	Sciaenidae	Odontoscion	<i>Odontoscion dentex</i>	(Cuvier, 1830)
Actinopterygii	Perciformes	Mullidae	Pseudupeneus	<i>Pseudupeneus maculatus</i>	(Bloch, 1793)
Actinopterygii	Perciformes	Mullidae	Mulloidichthys	<i>Mulloidichthys martinicus</i>	(Cuvier, 1829)
Actinopterygii	Perciformes	Pempheridae	Pempheris	<i>Pempheris schomburgkii</i>	Müller & Troschel, 1848
Actinopterygii	Perciformes	Chaetodontidae	Chaetodon	<i>Chaetodon ocellatus</i>	Bloch, 1787
Actinopterygii	Perciformes	Chaetodontidae	Chaetodon	<i>Chaetodon striatus</i>	Linnaeus, 1758
Actinopterygii	Perciformes	Chaetodontidae	Chaetodon	<i>Chaetodon capistratus</i>	Linnaeus, 1759
Actinopterygii	Perciformes	Chaetodontidae	Prognathodes	<i>Prognathodes aculeatus</i>	(Poey, 1860)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacanthidae	Holacanthus	<i>Holacanthus ciliaris</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacanthidae	Holacanthus	<i>Holacanthus tricolor</i>	(Bloch, 1795)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacanthidae	Pomacanthus	<i>Pomacanthus paru</i>	(Bloch, 1787)
Actinopterygii	Perciformes	Kyphosidae	Kyphosus	<i>Kyphosus sectatrix</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Chromis	<i>Chromis cyanea</i>	(Poey, 1860)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	<i>Stegastes partitus</i>	(Poey, 1868)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	<i>Stegastes adustus</i>	(Troschel, 1865)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	<i>Stegastes planifrons</i>	(Cuvier, 1830)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	<i>Stegastes leucostictus</i>	(Müller & Troschel, 1848)
Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Microspathodon	<i>Microspathodon chrysurus</i>	(Cuvier, 1830)

Continuación

Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Abudefduf	<i>Abudefduf saxatilis</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Labridae	Bodianus	<i>Bodianus rufus</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Perciformes	Labridae	Thalassoma	<i>Thalassoma bifasciatum</i>	(Bloch, 1791)
Actinopterygii	Perciformes	Labridae	Halichoeres	<i>Halichoeres garnoti</i>	(Valenciennes, 1839)
Actinopterygii	Perciformes	Labridae	Halichoeres	<i>Halichoeres bivittatus</i>	(Bloch, 1791)
Actinopterygii	Perciformes	Labridae	Clepticus	<i>Clepticus parrae</i>	(Bloch & Schneider, 1801)
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Scarus	<i>Scarus vetula</i>	Bloch & Schneider, 1801
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Scarus	<i>Scarus taeniopterus</i>	Lesson, 1829
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Scarus	<i>Scarus iseri</i>	(Bloch, 1789)
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Sparisoma	<i>Sparisoma rubripinne</i>	(Valenciennes, 1840)
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Sparisoma	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	(Valenciennes, 1840)
Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Sparisoma	<i>Sparisoma viride</i>	(Bonnaterre, 1788)
Actinopterygii	Perciformes	Labrisomidae	Malacoctenus	<i>Malacoctenus triangulatus</i>	Springer, 1959
Actinopterygii	Perciformes	Labrisomidae	Malacoctenus	<i>Malacanthus plumieri</i>	(Bloch, 1786)
Actinopterygii	Perciformes	Chaenopsidae	<i>Emblemaria</i>	<i>Emblemaria sp.</i>	Jordan & Gilbert, 1883
Actinopterygii	Perciformes	Blenniidae	Ophioblennius	<i>Ophioblennius macclurei</i>	(Silvester, 1915)
Actinopterygii	Perciformes	Gobiidae	Elacatinus	<i>Elacatinus oceanops</i>	Jordan, 1904
Actinopterygii	Perciformes	Gobiidae	Coryphopterus	<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	Gill, 1863
Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	<i>Acanthurus tractus</i>	Poey, 1860
Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	<i>Acanthurus chirurgus</i>	(Bloch, 1787)
Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	<i>Acanthurus coeruleus</i>	Bloch & Schneider, 1801
Actinopterygii	Perciformes	Sphyraenidae	Sphyraena	<i>Sphyraena barracuda</i>	(Edwards, 1771)
Actinopterygii	Perciformes	Scombridae	Scomberomorus	<i>Scomberomorus regalis</i>	(Bloch, 1793)
Actinopterygii	Pleuronectiformes	Bothidae	Bothus	<i>Bothus maculiferus</i>	(Poey, 1860)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Balistidae	Melichthys	<i>Melichthys niger</i>	(Bloch, 1786)

Continuación

Actinopterygii	Tetraodontiformes	Balistidae	Canthidermis	<i>Canthidermis sufflamen</i>	(Mitchill, 1815)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Balistidae	Balistes	<i>Balistes vetula</i>	Linnaeus, 1758
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Monacanthidae	Cantherhines	<i>Cantherhines pullus</i>	(Ranzani, 1842)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Ostraciidae	Lactophrys	<i>Lactophrys triqueter</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Ostraciidae	Acanthostracion	<i>Acanthostracion quadricornis</i>	(Linnaeus, 1758)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Tetraodontidae	Canthigaster	<i>Canthigaster rostrata</i>	(Bloch, 1786)
Actinopterygii	Tetraodontiformes	Diodontidae	Diodon	<i>Diodon holocanthus</i>	Linnaeus, 1758

ANEXO 6. Nuevos registros de peces.

Tulum	Akumal	Playa del Carmen	Punta Nizuc
<i>Synodus intermedius</i>	<i>Urobatis jamaicensis</i>	<i>Synodus intermedius</i>	<i>Aulostomus maculatus</i>
<i>Aulostomus maculatus</i>	<i>Ablennes hians</i>	<i>Serranus tigrinus</i>	<i>Hypoplectrus indigo</i>
<i>Scorpaena plumieri</i>	<i>Gramma loreto</i>	<i>Cephalopholis fulva</i>	<i>Mycteroperca venenosa</i>
<i>Serranus tigrinus</i>	<i>Caranx ruber</i>	<i>Lutjanus analis</i>	<i>Gramma loreto</i>
<i>Hypoplectrus nigricans</i>	<i>Lutjanus jocu</i>	<i>Lutjanus apodus</i>	<i>Caranx crysos</i>
<i>Caranx crysos</i>	<i>Odontoscion dentex</i>	<i>Lutjanus mahogoni</i>	<i>Caranx latus</i>
<i>Lutjanus analis</i>	<i>Chromis cyanea</i>	<i>Lutjanus griseus</i>	<i>Lutjanus analis</i>
<i>Lutjanus apodus</i>	<i>Stegastes leucostictus</i>	<i>Lutjanus jocu</i>	<i>Lutjanus griseus</i>
<i>Lutjanus griseus</i>	<i>Malacanthus plumieri</i>	<i>Gerres cinereus</i>	<i>Lutjanus jocu</i>
<i>Lutjanus jocu</i>	<i>Ophioblennius macclurei</i>	<i>Anisotremus surinamensis</i>	<i>Lutjanus synagris</i>
<i>Anisotremus surinamensis</i>	<i>Acanthurus tractus</i>	<i>Haemulon sciurus</i>	<i>Haemulon macrostomum</i>
<i>Haemulon chrysargyreum</i>	<i>Acanthurus coeruleus</i>	<i>Haemulon chrysargyreum</i>	<i>Haemulon plumierii</i>
<i>Haemulon carbonarium</i>	<i>Acanthostracion quadricornis</i>	<i>Haemulon macrostomum</i>	<i>Haemulon carbonarium</i>
<i>Pempheris schomburgkii</i>		<i>Haemulon carbonarium</i>	<i>Haemulon parra</i>
<i>Chaetodon striatus</i>		<i>Chaetodon striatus</i>	<i>Calamus nodosus</i>
<i>Chaetodon capistratus</i>		<i>Chaetodon capistratus</i>	<i>Pseudupeneus maculatus</i>
<i>Prognathodes aculeatus</i>		<i>Prognathodes aculeatus</i>	<i>Mulloidichthys martinicus</i>
<i>Kyphosus sectatrix</i>		<i>Holacanthus tricolor</i>	<i>Holacanthus tricolor</i>
<i>Stegastes partitus</i>		<i>Pomacanthus paru</i>	<i>Pomacanthus paru</i>
<i>Stegastes adustus</i>		<i>Chromis cyanea</i>	<i>Chromis cyanea</i>
<i>Thalassoma bifasciatum</i>		<i>Stegastes partitus</i>	<i>Stegastes partitus</i>
<i>Scarus taeniopterus</i>		<i>Stegastes adustus</i>	<i>Stegastes adustus</i>
<i>Scarus iseri</i>		<i>Stegastes planifrons</i>	<i>Stegastes planifrons</i>
<i>Sparisoma rubripinne</i>		<i>Stegastes leucostictus</i>	<i>Microspathodon chrysurus</i>
<i>Sparisoma aurofrenatum</i>		<i>Bodianus rufus</i>	<i>Abudefduf saxatilis</i>

Continuación

<i>Malacoctenus triangulatus</i>	<i>Thalassoma bifasciatum</i>	<i>Thalassoma bifasciatum</i>
<i>Malacanthus plumieri</i>	<i>Halichoeres garnoti</i>	<i>Halichoeres garnoti</i>
<i>Ophioblennius macclurei</i>	<i>Halichoeres bivittatus</i>	<i>Scarus vetula</i>
<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	<i>Clepticus parrae</i>	<i>Scarus taeniopterus</i>
<i>Acanthurus tractus</i>	<i>Scarus vetula</i>	<i>Malacoctenus triangulatus</i>
<i>Acanthurus chirurgus</i>	<i>Scarus taeniopterus</i>	<i>Malacanthus plumieri</i>
<i>Acanthurus coeruleus</i>	<i>Scarus iseri</i>	<i>Ophioblennius macclurei</i>
<i>Bothus maculiferus</i>	<i>Sparisoma rubripinne</i>	<i>Elacatinus oceanops</i>
<i>Melichthys niger</i>	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	<i>Sphyræna barracuda</i>
<i>Cantherhines pullus</i>	<i>Sparisoma viride</i>	<i>Bothus maculiferus</i>
<i>Diodon holocanthus</i>	<i>Acanthurus tractus</i>	<i>Melichthys niger</i>
	<i>Acanthurus tractus</i>	<i>Canthidermis sufflamen</i>
	<i>Acanthurus coeruleus</i>	
	<i>Scomberomorus regalis</i>	
	<i>Melichthys niger</i>	
	<i>Balistes vetula</i>	
	<i>Acanthostracion quadricornis</i>	
	<i>Canthigaster rostrata</i>	
	<i>Diodon holocanthus</i>	

ANEXO 7. Sistemática de moluscos del centro y norte de Quintana Roo.

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autor
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Fissurella</i>	<i>Fissurella fascicularis</i>	Lamarck, 1822
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Fissurella</i>	<i>Fissurella rosea</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Fissurella</i>	<i>Fissurella nodosa</i>	(Born, 1778)
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Fissurella</i>	<i>Fissurella sp</i>	
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Diodora</i>	<i>Diodora cayenensis</i>	(Lamarck, 1822)
Gastropoda	Lepetellida	Fissurellidae	<i>Diodora</i>	<i>Diodora listeri</i>	(d'Orbigny, 1847)
Gastropoda	Trochida	Tegulidae	<i>Cittarium</i>	<i>Cittarium pica</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Trochida	Tegulidae	<i>Tegula</i>	<i>Tegula fasciata</i>	(Born, 1778)
Gastropoda	Trochida	Turbinidae	<i>Lithopoma</i>	<i>Lithopoma phoebium</i>	(Röding, 1798)
Gastropoda	Trochida	Turbinidae	<i>Lithopoma</i>	<i>Lithopoma tectum</i>	(Lightfoot, 1786)
Gastropoda	Trochida	Turbinidae	<i>Lithopoma</i>	<i>Lithopoma caelatum</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Trochida	Turbinidae	<i>Lithopoma</i>	<i>Lithopoma americanum</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Littorinimorpha	Vermetidae	<i>Thylacodes</i>	<i>Thylacodes decussatus</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cypraeidae	<i>Luria</i>	<i>Luria cinerea</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cypraeidae	<i>Macrocypraea</i>	<i>Macrocypraea zebra</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cypraeidae	<i>Macrocypraea</i>	<i>Macrocypraea cervus</i>	(Linnaeus, 1771)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cypraeidae	<i>Bursa</i>	<i>Bursa corrugata</i>	(Perry, 1811)
Gastropoda	Littorinimorpha	Ovulidae	<i>Cyphoma</i>	<i>Cyphoma gibbosum</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Littorinimorpha	Strombidae	<i>Lobatus</i>	<i>Aliger gigas</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cassidae	<i>Cassis</i>	<i>Cassis flammea</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Littorinimorpha	Cymatiidae	<i>Linatella</i>	<i>Linatella caudata</i>	(Gmelin, 1791)
Gastropoda	Littorinimorpha	Naticidae	<i>Polinices</i>	<i>Polinices lacteus</i>	(Guilding, 1834)
Gastropoda	Littorinimorpha	Naticidae	<i>Polinices</i>	<i>Poliniceus hepaticus</i>	(Röding, 1798)
Gastropoda	Caenogastropoda	Cerithidae	<i>Cerithium</i>	<i>Cerithium litteratum</i>	(Born, 1778)
Gastropoda	Caenogastropoda	Cerithidae	<i>Cerithium</i>	<i>Cerithium eburneum</i>	Bruguère, 1792

Continuación

Gastropoda	Caenogastropoda	Cerithidae	<i>Cerithium</i>	<i>Cerithium muscarum</i>	Say, 1832
Gastropoda	Caenogastropoda	Cerithidae	<i>Cerithium</i>	<i>Cerithium</i> sp	
Gastropoda	Neogastropoda	Fascioliidae	<i>Fasciolaria</i>	<i>Fasciolaria tulipa</i>	(Linnaeus, 1758)
Gastropoda	Neogastropoda	Muricidae	<i>Coralliophila</i>	<i>Coralliophila erosa</i>	(Röding, 1798)
Gastropoda	Neogastropoda	Muricidae	<i>Murex</i>	<i>Murex</i> sp	
Gastropoda	Neogastropoda	Muricidae	<i>Stramonita</i>	<i>Stramonita rustica</i>	(Lamarck, 1822)
Gastropoda	Neogastropoda	Olividae	<i>Americoliva</i>	<i>Americoliva sayana</i>	(Ravenel, 1834)
Polyplacophora	Chitonida	Chitonidae	<i>Chiton</i>	<i>Chiton</i> sp	
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Barbatia</i>	<i>Barbatia candida</i>	(Helbling, 1779)
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Barbatia</i>	<i>Barbatia domingensis</i>	(Lamarck, 1819)
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Arca</i>	<i>Arca zebra</i>	Swainson, 1833
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Arca</i>	<i>Arca imbricata</i>	Bruguère, 1789
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Arca</i>	<i>Arca</i> sp	
Bivalvia	Arcida	Glycymerididae	<i>Tucetona</i>	<i>Tucetona pectinata</i>	(Gmelin, 1791)
Bivalvia	Mytilida	Mytilidae	<i>Lithophaga</i>	<i>Lithophaga antillarum</i>	(d'Orbigny, 1853)
Bivalvia	Mytilida	Mytilidae	<i>Modulus</i>	<i>Modiolus squamosus</i>	Beauperthey, 1967
Bivalvia	Ostreida	Isognomon	<i>Isognomon</i>	<i>Isognomon radiatus</i>	(Anton, 1838)
Bivalvia	Ostreida	Ostreidae	<i>Dendostrea</i>	<i>Dendostrea frons</i>	(Linnaeus, 1758)
Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Lima</i>	<i>Lima caribaea</i>	d'Orbigny, 1853
Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Lima</i>	<i>Lima lima</i>	(Linnaeus, 1758)
Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Lima</i>	<i>Limaria pellucida</i>	(C. B. Adams, 1848)
Bivalvia	Limida	Ctenoides	<i>Ctenoides</i>	<i>Ctenoides scaber</i>	(Born, 1778)
Bivalvia	Pectinida	Anomidae	<i>Anomia</i>	<i>Anomia simplex</i>	d'Orbigny, 1853
Bivalvia	Pectinida	Pectinidae	<i>Caribachlamys</i>	<i>Caribachlamys ornata</i>	(Lamarck, 1819)
Bivalvia	Pectinida	Pectinidae	<i>Caribachlamys</i>	<i>Caribachlamys sentis</i>	(Reeve, 1853)
Bivalvia	Pectinida	Pectinidae	<i>Argopecten</i>	<i>Argopecten gibbus</i>	(Linnaeus, 1758)
Bivalvia	Lucinida	Lucinidae	<i>Ctena</i>	<i>Ctena orbiculata</i>	(Montagu, 1808)

Continuación

Bivalvia	Lucinida	Lucinidae	<i>Callucina</i>	<i>Callucina keenae</i>	(Chavan, 1971)
Bivalvia	Lucinida	Lucinidae	<i>orbicularis</i>	<i>Codakia orbicularis</i>	(Linnaeus, 1758)
Bivalvia	Lucinida	Lucinidae	<i>costata</i>	<i>Clathrolucina costata</i>	(d'Orbigny, 1845)
Bivalvia	Venerida	Chamidae	<i>Chama</i>	<i>Chama macerophylla</i>	Gmelin, 1791
Bivalvia	Venerida	Veneridae	<i>Chione</i>	<i>Chione cancellata</i>	(Linnaeus, 1767)
Bivalvia	Venerida	Veneridae	<i>Transennella</i>	<i>Transennella stimpsoni</i>	Dall, 1902
Bivalvia	Cardiida	Chamidae	<i>Chama</i>	<i>Chama sinuosa</i>	Broderip, 1835
Bivalvia	Cardiida	Cardiidae	<i>Dallocardia</i>	<i>Dallocardia muricata</i>	(Linnaeus, 1758)
Bivalvia	Cardiida	Cardiidae	<i>Papyridea</i>	<i>Papyridea soleniformis</i>	(Bruguière, 1789)
Bivalvia	Cardiida	Cardiidae	<i>Ameritella</i>	<i>Ameritella sybaritica</i>	(Dall, 1881)
Bivalvia	Cardiida	Semelidae	<i>Semele</i>	<i>Semele proficua</i>	(Pulteney, 1799)
Bivalvia	Cardiida	Tellinidae	<i>Arcopagia</i>	<i>Arcopagia fausta</i>	(Pulteney, 1799)
Bivalvia	Cardiida	Tellinidae	<i>Tellina</i>	<i>Tellinella listeri</i>	(Röding, 1798)
Cephalopoda	Octopoda	Octopodidae	<i>Octopus</i>	<i>Octopus sp</i>	

ANEXO 8. Nuevos registros de especies de moluscos.

Centro y norte de Quintana Roo
<i>Fissurella fascicularis</i>
<i>Fissurella rosea</i>
<i>Diodora listeri</i>
<i>Lithopoma tectum</i>
<i>Lithopoma caelatum</i>
<i>Thylacodes decussatus</i>
<i>Bursa corrugata</i>
<i>Linatella caudata</i>
<i>Poliniceus hepaticus</i>
<i>Cerithium muscarum</i>
<i>Coralliophila erosa</i>
<i>Stramonita rustica</i>
<i>Americoliva sayana</i>
<i>Tucetona pectinata</i>
<i>Modiolus squamosus</i>
<i>Dendostrea frons</i>
<i>Lima lima</i>
<i>Limaria pellucida</i>
<i>Ctenoides scaber</i>
<i>Caribachlamys sentis</i>
<i>Argopecten gibbus</i>
<i>Callucina keenae</i>
<i>Codakia orbicularis</i>
<i>Clathrolucina costata</i>
<i>Transennella stimpsoni</i>
<i>Chama sinuosa</i>
<i>Dallocardia muricata</i>
<i>Papyridea soleniformis</i>
<i>Ameritella sybaritica</i>
<i>Semele proficua</i>

Continuación

<i>Arcopagia fausta</i>
