



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Unidad Iztapalapa

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

**BIODIVERSIDAD DE MACROALGAS, PASTOS MARINOS E INVERTEBRADOS
EN LA ZONA NOROESTE DE LA ISLA DE COZUMEL**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO

DE MAESTRO EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

HIDROBIÓL. FRANCISCO JAVIER RAMÍREZ MALDONADO

COMITÉ TUTORAL

Codirectores:

Dra. Laura Georgina Calva Benítez

Dr. Everardo Barba Macías

Asesora:

Dra. María del Rocío Zárate Hernández

**La Maestría en Biología de la
Universidad Autónoma Metropolitana
pertenece al Padrón de
Posgrados de Calidad de la SECIHTI.**

El jurado designado por la
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis que presentó
Hidrobiól. Francisco Javier Ramírez Maldonado

El día 4 de junio del año 2026

COMITÉ TUTORAL Y JURADO

Codirectora Dra. Laura Georgina Calva Benítez

Codirector Everardo Barba Macías

Asesora María del Rocío Zárate Hernández

Sinodal Dra. María Luisa Núñez Reséndiz

Sinodal M. en B. E. Sergio Humberto Álvarez Hernández

Sinodal Dra. Alicia Cruz Martínez

Declaración de originalidad

El que suscribe **FRANCISCO JAVIER RAMIREZ MALDONADO**, alumno (a) del posgrado **MAESTRÍA EN BIOLOGÍA**, de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y autor(a) de la tesis o idónea comunicación de resultados titulada: **“BIODIVERSIDAD DE MACROALGAS, PASTOS MARINOS E INVERTEBRADOS EN LA ZONA NOROESTE DE LA ISLA DE COZUMEL”**,

Declaro que:

1. La tesis o idónea comunicación de resultados que presento ante el H. jurado para la obtención del grado de Maestro en Biología es de mi autoría y original creación, producto del resultado de mi trabajo de investigación personal e individual; el cual cuenta con las correspondientes citas textuales del material bibliográfico utilizado y con el debido otorgamiento de los créditos autorales.
2. En la tesis o idónea comunicación de resultados no he reproducido párrafos completos; ilustraciones, fotografías, diagramas, cuadros y tablas, sin otorgamiento del crédito autoral y fuente correspondiente.
3. En consecuencia, relevo de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma Metropolitana de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la tesis o idónea comunicación de resultados, respondiendo por la autoría y originalidad de la misma, asumiendo todas las consecuencias económicas y jurídicas si ésta no fuese de mi creación.

La presente declaración de originalidad se firma en la Ciudad de México el 4 de junio del 2026.

Atentamente



Francisco Javier Ramírez Maldonado

Este documento debe ser firmado con tinta azul y debe anexarse copia en la tesis o idónea comunicación de resultados (tesina, reporte, etc.), el documento original será conservado por el Coordinador del Posgrado.

a mis padres Margarita y José Luis,

a mis hermanos José Luis y Xóchitl

a mis sobrinos Santiago, Naomi, Joshua e Iktan,

a la memoria de mi hermano Josué, a quien amo y extraño mucho.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, que me dio la oportunidad de cursar mis estudios de Maestría y todo el apoyo que siempre me ha brindado.

La realización de este trabajo fue posible con el apoyo económico como becario, brindado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECHTI), No. de becario 1255996. Al financiamiento por los proyectos: **Evaluación ambiental y de macroalgas bioindicadoras de contaminación en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel**. Proyecto CONANP/PROCOCODES/6540/2018 (Programa de Conservación para el desarrollo sostenible). Responsable: Dra. Laura Georgina Calva Benítez y del proyecto Divisional de la DCBS, UAM-I intitulado **“Caracterización ecológica de los ambientes costeros mexicanos”**. (2019-2022). Responsable: Dra. Rocío Torres Alvarado. Presupuesto de Dra. Laura Georgina Calva B.

A mi comité tutorial

Dra. Laura G. Calva, le agradezco inmensamente la paciencia que me tuvo y la valiosa oportunidad de realizar esta investigación bajo su tutela. Sus enseñanzas y consejos no solo se quedan plasmados en este trabajo, sino que trascienden para enriquecer toda mi vida profesional.

Al **Dr. Everardo Barba**, por compartir generosamente sus valiosos conocimientos y aportaciones. Sus orientaciones fueron cruciales para la correcta realización de los análisis y la integración final de este trabajo.

A la **Dra. María Del Rocío Zárate**, por su indispensable apoyo en las clases de estadística y por resolver todas mis dudas con gran claridad. Valoro enormemente su gentileza y la disponibilidad que siempre mostró para explicarme.

A mi jurado de revisión, la **Dra. María Luisa Núñez Reséndiz, M. en B. Exp. Sergio Humberto Álvarez Hernández** y la **Dra. Alicia Cruz Martínez**, por su tiempo y comentarios sobre la tesis.

El presente estudio “Biodiversidad de macroalgas pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel” se realizó en el Laboratorio de Ecosistemas Costeros y en el Laboratorio de Macroalgas Marinas y Salobres, ambos del Departamento de Hidrobiología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi Familia

A mis amados padres, **Margarita Maldonado y José Luis Ramirez**, quienes son las personas que más admiro y quiero en el mundo. Su amor incondicional, su sacrificio y su apoyo constante a lo largo de toda mi vida fueron el cimiento para alcanzar esta meta. Este logro no es solo mío, es profundamente nuestro. Los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos, gracias por ser mi red de apoyo, por sus consejos oportunos y por las palabras que siempre me impulsaron, evitando que me rindiera en cualquier etapa de mi vida.

- A mi querida **Xochitl Ramirez**, mi consejera más personal, quien me conoce mejor que nadie. Gracias por escucharme siempre con paciencia y por darme el regalo de dos hermosos sobrinos, **Joshua e Iktan**, quienes son mi alegría con su ternura y energía.
- A **José Luis Ramirez**, gracias por haberme impulsado a ser una mejor persona. Aprecio profundamente que me enseñaras una nueva forma de llevar mi vida, a tomar las cosas con menos estrés y más calma, mientras nos hacíamos más fuertes juntos.
- A mi inolvidable hermano, **Josué Ramirez†**. Al escribir estas líneas, no puedo contener las lágrimas; te extraño profundamente. Gracias por todos

tus sabios consejos, por ser estricto conmigo cuando fue necesario y por ser un ejemplo para seguir cuando nuestro padre no estaba cerca. Tu recuerdo y el haberme alentado en la adolescencia a perseguir mis sueños, me acompañan en este triunfo.

- A mis sobrinos **Santiago y Naomi**. Gracias por ser ese par de luceros que iluminan incluso las noches más oscuras. En cada paso difícil de este camino, ustedes han sido mi chispa de alegría, mi motivo para seguir adelante y la certeza de que siempre hay luz esperándome al final.

A mis Amigos y Colegas

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron de este camino una experiencia más ligera y memorable:

- A **Ethan Melgoza**, mi más sincero agradecimiento por ser un pilar intelectual y emocional. Desde las largas y profundas conversaciones sobre ideas y teorías que enriquecieron este trabajo, hasta los momentos críticos en que mis fuerzas parecían flaquear, siempre encontraste las palabras justas para recordarme el valor de mi esfuerzo. Gracias por tu amistad, tu perspicacia y por mantener viva la chispa de la motivación.
- A **Eduardo Rodríguez**, gracias por ser esa fuente constante de apoyo y por la motivación inquebrantable que me diste en cada paso de este arduo camino. Este logro es, en gran parte, gracias a tu presencia firme y genuina
- A la **Dra. Ma. Luisa Núñez**, mi agradecimiento trasciende lo académico. Gracias por guiarme con tanta dedicación y motivarme a seguir adelante;

valoro enormemente el tiempo y el cariño que dedicaste a ser mi profesora. Pero lo que más aprecio es que, en el proceso, te hayas convertido en una amiga incondicional. Gracias por tu alegría contagiosa, por tu espíritu siempre positivo y por iluminar este camino con tu presencia.

- A **Anahí Carranza y Karina López**, gracias por ser esa voz que me recordaba mi potencial en los momentos de duda y por contagiarme siempre de su energía positiva. Sus palabras de aliento fueron el motor que me impulsó a seguir adelante.
- Al **M. en B. Sergio Álvarez**, le agradezco el valioso tiempo y asesoría que me brindó con los análisis estadísticos, a pesar de tener una agenda profesional tan ocupada.
- A **mis amigos del laboratorio de Macroalgas**: Les agradezco su apoyo, sus ideas y sus valiosos consejos. Los aprecio muchísimo.
- A **Liliana Ramos**, por esas conversaciones que no solo fueron de apoyo y motivación. Valoro profundamente tu compañía, tu comprensión y cómo tus palabras siempre me impulsaron a seguir luchando en este camino. Tu presencia y tu apoyo significaron mucho más de lo que las palabras pueden expresar.
- A **Ivanka Vargas, Jhon Orta y Pamela Lazo**, por el conocimiento compartido en clases y laboratorios, por su colaboración en el trabajo práctico y por esas pláticas que siempre servían para despejar la mente y recargar energías.

RESUMEN

Introducción. La zona costera, caracterizada por su dinamismo y riqueza biológica, alberga ecosistemas complejos como arrecifes, manglares, y plataformas rocosas. En estos hábitats, las comunidades de macroalgas y pastos marinos desempeñan funciones ecológicas vitales, actuando como productores primarios y bioindicadores o sitios de refugio y crianza para numerosas especies de invertebrados. La estructura y distribución de estos organismos están intrínsecamente reguladas por la interacción entre variables fisicoquímicas del agua y sedimentos. En el Caribe mexicano, la isla de Cozumel es un sitio de alta biodiversidad que enfrenta presiones crecientes como el calentamiento global, el turismo y altos aportes de nutrientes derivados de la acumulación de los fenómenos actuales de arribazón masiva de sargazo que alteran las condiciones ambientales base, afectando la estabilidad de los bentos. Por consiguiente, es importante caracterizar la biodiversidad de dichos grupos taxonómicos en la región noroeste de Cozumel y analizar su estrecha relación con los parámetros ambientales hidrológicos y del sedimento para generar un punto de partida para monitoreos futuros que permitan analizar y comprender la dinámica. **Objetivos.** Determinar la biodiversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel; Evaluar las variables fisicoquímicas (pH, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura y profundidad); Analizar la textura de los sedimentos, su contenido de carbono orgánico y carbonatos; Relacionar las variables fisicoquímicas (pH, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura y profundidad) y variables sedimentarias (textura de sedimentos, contenido de carbono orgánico y carbonatos) con la

presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados. **Materiales y métodos.** Los muestreos se efectuaron en la zona noroeste de la isla de Cozumel durante octubre y noviembre de 2018 y julio de 2022 y 2023, evaluándose variables ambientales tanto del agua como de los sedimentos. Para la identificación taxonómica de macroalgas y pastos marinos, se realizaron observaciones morfo-anatómicas mediante microscopía óptica y estereoscópica; mientras que, para los invertebrados, el registro se basó en observaciones *in situ* y análisis de material audiovisual, apoyándose en literatura especializada. Adicionalmente, se caracterizaron los sedimentos mediante técnicas específicas y se aplicaron análisis multivariados para determinar las relaciones entre los organismos y las variables ambientales. **Resultados:** Se identificaron 57 taxones de macroalgas distribuidas en tres Divisiones (34 Chlorophyta, 19 Rhodophyta y cuatro Ochrophyta); 15 Órdenes y 23 Familias, cuatro especies consideradas bioindicadoras y nueve nuevos registros para Cozumel; asimismo, se registraron tres especies de pastos marinos distribuidas en un Orden (Alismatales) y dos Familias. En cuanto a la fauna, se determinaron 81 especies de invertebrados distribuidos en cinco Phyla (cuatro Porifera, 20 Cnidaria, seis Annelida, 17 Mollusca, 13 Arthropoda y 21 Echinodermata); 15 Clases; 36 Órdenes y 61 Familias, de las cuales 12 se catalogan como bioindicadoras y 17 constituyen nuevos registros. Tróficamente, predominaron los filtradores y planctívoros. Respecto a las variables ambientales, se registró una profundidad media de 1.8 m y una temperatura promedio de 29.1°C, influenciada por la batimetría somera, la estacionalidad y corrientes. La salinidad (34.1 UPS) y el pH (8.06) mostraron valores típicos del Caribe y condiciones

alcalinas derivadas de la fotosíntesis, proceso evidenciado también por la concentración de oxígeno disuelto (6.23 mg/L). En los sedimentos predominó la arena fina, con contenidos de carbono orgánico (0.56%) y carbonatos (64.79%). Aunque la comunidad biológica mostró homogeneidad temporal, se evidenció heterogeneidad espacial, donde la dominancia de macroalgas o invertebrados dependió del tipo de sustrato y la exposición al oleaje. En la zona arenosa hubo una mayor riqueza de macroalgas, con 53 especies, seguido de la zona rocosa con 33 y los charcos de marea con 13; La riqueza de invertebrados fue mayor en la zona rocosa con 60 especies, en segundo lugar, fueron los charcos de marea y con menos riqueza la zona arenosa con 18. Asimismo, la zona arenosa como la zona rocosa presentaron tres taxa de pastos marinos. **Conclusión:** Este estudio establece una línea base para la zona noroeste de Cozumel. Fisicoquímicamente, se observaron variaciones temporales en el agua y un predominio de sedimentos arenosos (arena fina), las cuales se correlacionaron positivamente con el carbono orgánico. En términos de biodiversidad, se registraron 57 especies de macroalgas (con nueve nuevos registros para la isla), tres de pastos marinos y 81 de invertebrados, destacando a Chlorophyta y Echinodermata, respectivamente. Se identificaron especies bioindicadoras de contaminación y depredadores tope. Ecológicamente, las comunidades mostraron segregación espacial, ya que las macroalgas predominaron en sustratos arenosos y mostraron heterogeneidad espaciotemporal, en tanto, los invertebrados se asociaron prioritariamente a sustratos rocosos, artificiales y charcos de marea; al contrario de las macroalgas se observó menor heterogeneidad en el tiempo y estaciones. Los análisis multivariados

indicaron que la profundidad y la temperatura influyen inversamente en la distribución, revelando además una clara estructuración por grupos tróficos.

SUMMARY

Introduction. Coastal zones, characterized by their dynamic nature and high biological richness, support complex ecosystems such as coral reefs, mangroves, and rocky shores. Within these habitats, macroalgal and seagrass communities perform essential ecological functions, acting as primary producers, bioindicators, and refuge and nursery areas for numerous invertebrate species. The structure and distribution of these organisms are intrinsically regulated by the interaction of physicochemical variables in both the water column and sediments. In the Mexican Caribbean, Cozumel Island represents an area of high biodiversity that is increasingly exposed to pressures such as global warming, tourism, and elevated nutrient inputs associated with the accumulation of massive sargassum influx events. These factors alter baseline environmental conditions and affect the stability of benthic communities. Consequently, it is important to characterize the biodiversity of these taxonomic groups in northwestern Cozumel and to analyze their close relationship with hydrological and sediment environmental parameters, thereby establishing a baseline for future monitoring efforts aimed at understanding ecosystem dynamics. **Objectives.** To determine the biodiversity of macroalgae, seagrasses, and invertebrates in the northwestern region of Cozumel Island; to evaluate physicochemical variables (pH, salinity, dissolved oxygen, temperature, and depth); to analyze sediment texture, organic carbon content, and carbonate

content; and to examine the relationships between physicochemical variables (pH, salinity, dissolved oxygen, temperature, and depth) and sediment variables (sediment texture, organic carbon content, and carbonate content) with the occurrence of macroalgae, seagrasses, and invertebrates. **Materials and Methods.** Sampling was conducted in the northwestern region of Cozumel Island during October and November 2018 and July 2022 and 2023. Environmental variables from both the water column and sediments were assessed. Taxonomic identification of macroalgae and seagrasses was performed through morphological and anatomical observations using light and stereoscopic microscopy, whereas invertebrate records were based on in situ observations and audiovisual material analyses supported by specialized literature. Additionally, sediments were characterized using specific analytical techniques, and multivariate analyses were applied to determine relationships between organisms and environmental variables. **Results.** A total of 57 macroalgal taxa were identified, distributed among three divisions (34 Chlorophyta, 19 Rhodophyta, and four Ochrophyta), 15 orders, and 23 families. Four species were considered bioindicators, and nine represented new records for Cozumel. In addition, three seagrass species were recorded, belonging to one order (Alismatales) and two families. Regarding fauna, 81 invertebrate species were identified, distributed among six phyla (four Porifera, 20 Cnidaria, six Annelida, 17 Mollusca, 13 Arthropoda, and 21 Echinodermata), 15 classes, 36 orders, and 61 families. Of these, 12 species were classified as bioindicators and 17 represented new records for the island. From a trophic perspective, filter feeders and planktivores were the dominant groups. Environmental variables showed a mean depth of 1.8 m

and an average temperature of 29.1°C, influenced by shallow bathymetry, seasonality, and local currents. Salinity (34.1 PSU) and pH (8.06) exhibited values typical of Caribbean waters and alkaline conditions associated with photosynthetic activity, a process also reflected by dissolved oxygen concentrations (6.23 mg/L). Sediments were predominantly composed of fine sand, with organic carbon and carbonate contents of 0.56% and 64.79%, respectively. Although the biological community displayed temporal homogeneity, spatial heterogeneity was evident, with the dominance of macroalgae or invertebrates depending on substrate type and wave exposure. The sandy zone exhibited the highest macroalgal richness, with 53 species, followed by the rocky zone with 33 species and tide pools with 13 species. Invertebrate richness was highest in the rocky zone with 60 species, followed by tide pools, while the sandy zone showed the lowest richness with 18 species. Both sandy and rocky zones supported three seagrass taxa. **Conclusion.** This study establishes a baseline for the northwestern region of Cozumel Island. Physicochemical analyses revealed temporal variations in water conditions and a predominance of sandy sediments (fine sand), which were positively correlated with organic carbon content. In terms of biodiversity, 57 macroalgal species (including nine new records for the island), three seagrass species, and 81 invertebrate species were documented, with Chlorophyta and Echinodermata being the most prominent groups, respectively. Bioindicator species associated with pollution as well as top predators were identified. Ecologically, communities exhibited spatial segregation. Macroalgae predominated on sandy substrates and showed marked spatiotemporal heterogeneity, whereas invertebrates were primarily associated with rocky

substrates, artificial structures, and tide pools, displaying lower temporal and seasonal heterogeneity than macroalgae. Multivariate analyses indicated that depth and temperature exerted inverse effects on species distribution and further revealed a clear community structuring according to trophic groups.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES.....	vi
AGRADECIMIENTOS PERSONALES.....	viii
RESUMEN.....	xi
SUMMARY	xiv
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO.....	4
ANTECEDENTES	16
JUSTIFICACIÓN	19
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	21
HIPÓTESIS	22
OBJETIVO GENERAL	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
ÁREA DE ESTUDIO.....	23
METODOLOGÍA.....	25
Muestreo	25
Métodos Analíticos.....	28
Textura de Sedimentos	28
Determinación de Carbono Orgánico.....	29

Determinación de Carbonatos.....	30
Identificación de Organismos	31
Macroalgas	31
Pastos marinos	32
Invertebrados.....	32
Análisis estadísticos.....	33
Parámetros ambientales.....	33
Información y análisis biológicos	34
RESULTADOS	35
Variables ambientales de agua	35
Temperatura	35
Profundidad	36
Salinidad	37
pH	38
Oxígeno Disuelto.	39
Variables sedimentarias.....	42
Textura.....	42
Carbono orgánico	45
Carbonatos	46

Análisis de correlación.....	51
Resultados de riqueza de especies de macroalgas	52
Descripciones morfológicas de macroalgas.....	62
Riqueza de especies de pastos marinos.....	100
Descripciones morfológicas de pastos marinos.....	100
Riqueza de especies de Invertebrados Marinos	102
Descripción morfológica de invertebrados marinos	115
Análisis estadísticos.....	146
Índice de riqueza específica	146
Similitud.	150
Grupos tróficos	155
DISCUSIÓN.....	157
Variables ambientales del agua.....	157
Variables Sedimentarias	166
Riqueza específica ficoflorística	173
Riqueza específica de invertebrados marinos.....	183
Especies bioindicadoras de contaminación.....	192
Índices de similitud.....	198
Hábitos alimentarios	201

CONCLUSIONES.....	205
RECOMENDACIONES	210
REFERENCIAS.....	211

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio en la isla de Cozumel, Q. Roo.	25
Figura 2. Localización de las estaciones en la zona noroeste de la isla de Cozumel, Q. Roo.	28
Figura 3. Carcterización de tamaño de grano por análisis granulométrico.	29
Figura 4. Determinación del porcentaje de carbono orgánico (Gaudette <i>et al.</i> , 1974). 30	
Figura 5. Determinación del porcentaje de carbonatos a traves del método de digestión (Twenhofel y Tyler, 1941).	31
Figura 6. Temperatura del agua en las estaciones de muestreo a través de los años de la zona noroeste de la isla de Cozumel.	36
Figura 7. Variación de la profundidad en las estaciones de muestreo de la zona noroeste de la isla de Cozumel.	37
Figura 8. Distribución anual de la salinidad del agua en la zona noroeste de la isla de Cozumel.	38
Figura 9. Distribución entre 2022 y 2023 del pH del agua de la zona noroeste de la isla de Cozumel.	39

Figura 10.	Distribución espacial de 2018 del oxígeno disuelto de la zona noroeste de la isla de Cozumel.....	40
Figura 11.	Distribución temporal del tipo de sedimento: granulo, arena muy gruesa, arena gruesa, arena media arena fina, arena muy fina y limo grueso en la zona noroeste de la isla de Cozumel en: a) octubre-noviembre (2018), b) julio 2022 y c) julio 2023).....	44
Figura 12.	Distribución temporal de Carbono orgánico en la zona noroeste de la isla de Cozumel en: a) octubre-noviembre 2018 b) julio 2022 c) julio 2023).	46
Figura 13.	Distribución temporal de carbonatos en la zona noroeste de la isla de Cozumel en octubre-noviembre 2018, julio 2022 y julio 2023.....	47
Figura 14.	Porcentaje de riqueza de especies de macroalgas por División en la zona noroeste de Cozumel durante 2018, 2022 y 2023.....	55
Figura 15.	<i>Ulva intestinalis</i> , A. Hábito. Escala= 1cm B. Células en cadena. 200 µm; . <i>Cladophora catenata</i> , C. Hábito. Escala= 1 cm D. Sifones. 200 µm; . <i>Chaetomorpha gracilis</i> . E. Hábito. Escala= 2 cm. F. Células del filamento. Escala= 200 µm; . <i>Dictyosphaeria cavernosa</i> . G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Células superficiales. Escala= 400 µm.	86
Figura 16.	<i>Ventricaria ventricosa</i> , A. Hábito. Escala= 5 cm B. Acercamiento a la célula macroscópica. 3mm; . <i>Caulerpa cupressoides</i> . C. Hábito. Escala= 1cm. D. Ramilla. Escala= 1 mm; . <i>Caulerpa cupressoides var. flabellata</i> . E. Hábito. Escala= 1 cm. F. células medulares. Escala= 3 mm; . <i>Caulerpa lanuginosa</i> . G. Hábito. Escala= 2cm. H. Ramilla. Escala= 3 mm.....	87

Figura 17. *Caulerpa mexicana*, A. Hábito. Escala= 1 cm B. Ramillas de la fronda. 2mm; . *Caulerpa microphysa*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Ramillas. Escala= 3 mm; . *Caulerpa prolifera*, E. Hábito. Escala= 2 cm F. fronda. Escala 3 mm; . *Caulerpa sertularoides*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Ramillas. Escala= 3 mm. 88

Figura 18. *Avrainvillea nigricans*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Sifones de la fronda. Escala= 100 µm; . *Avrainvillea silvana*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Sifones de la fronda. Escala= 200 µm; . *Boodleopsis verticillata*, E. Hábito. Escala= 1 cm F. Sifones. 300 µm; . *Halimeda gracilis*. G. Hábito. Escala= 2cm H. Utrículo. Escala= 100 µm. 89

Figura 19. *Halimeda monile*, A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Utrículos. Escala= 200 µm; . *Halimeda opuntia*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala=200 µm; . *Halimeda scabra*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala= 100 µm; . *Halimeda simulans*. G. Hábito. Escala 2 cm. H. Utrículos. Escala 200 µm. 90

Figura 20. *Penicillus dumetosus*. A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Utrículos del estípote. Escala= 200 µm; . *Penicillus lamouroxii*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala= 400 µm; . *Rhipocephalus oblongus*. E. Hábito. Escala= 1cm F. Sifón. Escala= 200 µm; . *Rhipocephalus phoenix*. G. Hábito. Escala= 1cm. H. Sifón. Escala= 140 µm. 91

Figura 21. *Rhipocephalus phoenix f brevifolius*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Utrículo. Escala= 100 µm; . *Rhipocephalus phoenix f. longifolius*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Sifones. Escala= 200 µm; . *Udotea cyathiformis f. infundibulum*. E. Hábito. Escala= 1cm. F. Utrículos del estípote. Escala= 200 µm; . *Udotea dixonii*: G Hábito. Escala 2cm; H. Utrículo. Escala= 100 µm. 92

Figura 22. *Udotea dotyi*: A. Hábito. Escala = 2cm; B. Utrículo. Escala= 50 µm; . *Udotea fibrosa*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. utrículo. Escala=100 µm; . *Udotea flabellum* E. Hábito. Escala= 1cm. F. Utrículo del estípide. Escala= 100 µm; . *Udotea luna*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Sifones de la fronda. Escala= 200 µm. 93

Figura 23. *Neomeris annulata*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Ramilla. Escala= 260µm; . *Acetabularia schenckii*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Fronda. Escala= 1mm; E. *Hydrolithon farinosum*. E. Hábito sobre *Ulva intestinalis*. Escala= 200 µm; FG. *Gelidium americanum*. F. Hábito. Escala= 1 cm. G. células medulares. Escala= 200 µm. 94

Figura 24. *Dichotomaria marginata*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Células medulares. Escala= 100 µm; . *Hypnea spinella*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Células medulares. Escala= 200µm; . *Eucheumatopsis isiformis*. E. Hábito. Escala= 1 cm F. células medulares. Escala= 200 µm; . *Meristotheca spinella*. G. Hábito Escala 2 cm. H. Células y filamentos medulares. Escala= 200 µm. 95

Figura 25. *Gracilaria cornea*. A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Ramillas. Células medulares= 300 µm; . *Coelothrix irregularis*, C. Hábito. Escala= 1 cm D. Células de la medula. 200 µm; . *Centroceras clavulatum*. E. Hábito. Escala= 5 mm. F. Ramilla. Escala= 200 µm; . *Dasya cf. pedicellata*. G. Hábito. Escala= 2 cm. H. Stichidia tetraesporangial. Escala= 200 µm. 96

Figura 26. *Dasya cf. crouaniana*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Células medulares. Escala= 150 µm; . *Dasya ocellata*. C. Hábito. Escala= 2 cm. D. Células medulares. Escala= 200 µm; . *Digenea arenahauriens*, E. Hábito. Escala= 1 cm F. Células

medulares. 100 μm ; . *Digenea mexicana*, G. Hábito. Escala= 2 cm H. Células medulares. 100 μm 97

Figura 27. *Alsidium seaforthii*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. células medulares. Escala= 200 μm ; . *Laurencia intricata*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Vista de tetraesporangio. Escala= 60 μm ; . *Laurencia microcladia* E. Hábito. Escala= 1 cm. F. Células medulaes. Escala= 200 μm ; . *Polysiphonia binneyi*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Células medulares. Escala= 50 μm 98

Figura 28. *Yuzurua poiteau*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Células medulares. Escala= 200 μm ; . *Dictyota pulchella*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. corte transversal. Escala= 300 μm ; . *Dictyota pinnatifida* E. Hábito. Escala= 1 cm F. corte transversal. Escala= 200 μm ; . *Padina pavonica* G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Utrículos. Escala= 100 μm ; IJ. *Sargassum cf. cymosum*. I. Hábito. Escala= 2cm. J. Filidio. Escala= 2mm. 99

Figura 29. *Halodule wrightii*, A. Hojas, estolones y rizomas. Escala= 2 cm B. Corte transversal de hoja. 400 μm . . *Syringodium filiforme*. C. Hábito. Escala= 2 cm. D. Corte transversal de la hoja. Escala= 500 μm . . *Thalassia testudinum*. E. Hojas. Escala= 2cm. F. Corte transversal de la hoja. Escala 400 μm 102

Figura 30. Riqueza de especies de invertebrados marinos por Phylum en la zona noroeste de Cozumel. 106

Figura 31. Número de especies de macroalgas, pastos marinos e invertebrados marinos registrados por el tipo de playa en la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Figura 32.	Análisis de conglomerados sobre la similitud de macroalgas, pastos marinos e invertebrados entre estaciones y años de colecta. E1A, E1B, E2A, E3A, E3B, E4A, E5A, E6A, E6B, E7A, E8A. 1) 2018, 2) 2022, 3) 2023.	151
Figura 33.	Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables fisicoquímicas de agua (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triangulo verde corresponde a 2023).....	152
Figura 34.	Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables fisicoquímicas de agua y la presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triangulo verde corresponde a 2023).....	153
Figura 35.	Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables sedimentarias y presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triangulo verde corresponde a 2023).	154
Figura 36.	Análisis de conglomerados para determinar la similitud de las especies por hábitos alimentarios.....	156
Figura 37.	Análisis de componente principales (ACP) sobre la relación entre las estaciones y los hábitos alimentarios de los invertebrados marinos (puntos azules: 2018; triángulos rojos: 2022; círculos verdes: 2023).	157

Figura 38.	Muelle de la zona noroeste de la isla de Cozumel, correspondiente a la estación E6A y E6B.....	169
Figura 39.	Pradera heteroespecífica de pastos marinos.	181
Figura 40.	<i>Anamobaea orstedii</i> y <i>Spirobranchus giganteus</i> en diferentes sustratos dentro de la estación E6A y E6B.....	192
Figura 41.	<i>Ulva intestinalis</i> en la zona noroeste de la isla de Cozumel	194

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Coordenadas y clasificación del tipo de playa correspondientes a las estaciones de muestreo en la zona noroeste de la isla de Cozumel.	26
Tabla 2.	Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre años de muestreo.	40
Tabla 3.	Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre meses de muestreo.	41
Tabla 4.	Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre estaciones de muestreo.....	42
Tabla 5.	Variables sedimentarias, promedio de cada año, estadístico aplicado y probabilidad en playa Santa Pilar y Playa Barracuda.....	48
Tabla 6.	Variables sedimentarias, promedio de cada mes, estadístico aplicado y probabilidad en la zona noroeste de Cozumel.....	49

Tabla 7.	Variables sedimentarias, promedio de cada mes, estadístico aplicado y probabilidad en la zona noroeste de Cozumel.....	50
Tabla 8.	Correlación de Spearman entre 2018, 2022 y 2023.....	51
Tabla 9.	Correlación de Spearman entre muestreos.....	52
Tabla 10.	Listado de especies de macroalgas marinas de la zona noroeste de la isla de Cozumel. Presencia en los años de colecta.	57
Tabla 11.	Listado de especies invertebrados marinos de la zona noroeste de la isla de Cozumel. Presencia en los años de colecta (* registro nuevo).....	107
Tabla 12.	Riqueza específica de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en la zona noroeste de la isla de Cozumel	146
Tabla 13.	Diversidad beta a partir del índice de similitud de Jaccard de macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel	147
Tabla 14.	Riqueza específica de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en los diferentes tipos de playa de la zona noroeste de la isla de Cozumel.....	148
Tabla 15.	Diversidad beta a partir del índice de similitud de Jaccard a partir de playas arenosas rocosas y charcos de marea de las macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel	149
Tabla 16.	Tabla comparativa de temperaturas en sistemas costeros del Caribe.	161
Tabla 17.	Tabla comparativa de salinidad en sistemas costeros del Caribe....	163

Tabla 18.	Tabla comparativa de OD en sistemas costeros mexicanos.....	165
Tabla 19.	Tabla comparativa de pH en sistemas costeros mexicanos.....	166
Tabla 20.	Tabla comparativa de carbono orgánico en sedimentos en sistemas costeros mexicanos.....	170
Tabla 21.	Concentración promedio de carbonatos en sedimentos de calcio en algunos sistemas costeros del Caribe.	172

ABREVIATURAS

A.C.P: Análisis de componente principales

C.A.M: Comité Académico de la Maestría

C.O: Carbono Orgánico.

N.M.D.S: Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico

O.D: Oxígeno Disuelto.

PNAC: Parque Nacional Arrecifes de Cozumel.

PNAX: Parque Nacional Arrecifes de Xcalak

PNPM: Parque Nacional Puerto Morelos

RBSK: Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an

SAM: Sistema Arrecifal Mesoamerica

INTRODUCCIÓN

La zona costera se caracteriza por ser dinámica, cambiante y poseer una gran riqueza de especies; sin embargo, estas mismas propiedades la convierten en un área frágil (Silva *et al.*, 2017). Es considerada un espacio de alta diversidad de organismos vegetales y animales, lo que le otorga un gran valor comercial (Jiménez-Orocio *et al.*, 2015; Chávez-López, 2023) En ella se encuentran playas arenosas, mixtas o rocosas; las primeras se consideran áreas de difícil establecimiento para comunidades bentónicas debido a los constantes procesos físicos y geológicos que allí ocurren (González *et al.*, 2017). Las playas rocosas, a diferencia de las arenosas, permiten el establecimiento de una gran variedad de organismos al proporcionar un sustrato estable y duradero (Vassallo *et al.*, 2014). Dentro de ellas se localizan las pozas de marea, formadas por la erosión del oleaje sobre las rocas, lo que genera pequeñas oquedades con microcondiciones particulares. Estos ambientes destacan por su biodiversidad, determinada por procesos fisicoquímicos como la distancia al mar, las mareas, el tamaño y la profundidad de las pozas, así como la incidencia solar y del viento, lo que genera microclimas aislados que resultan en comunidades muy distintas al resto del ecosistema (Torruco *et al.*, 2012; González *et al.*, 2015).

El Caribe mexicano es una de las regiones con mayor diversidad biológica del país. En esta zona inicia el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), dentro del cual se encuentra el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC), ubicado en el municipio de Cozumel (Ardisson *et al.*, 2011). El PNAC fue declarado parque

nacional el 19 de julio de 1996 y sitio RAMSAR el 2 de febrero de 2005 (SECTUR, 2013). En este espacio se ha reportado una gran diversidad de organismos, incluyendo macroalgas, pastos marinos e invertebrados. Los corales representan hasta el 20% de los componentes bentónicos del parque (INECOL, 1998; Carriquiri *et al.*, 2017). No obstante, el incremento en la temperatura del agua, la contaminación derivada del turismo, el exceso de turbidez y, en los últimos años, los arribazones de sargazo han generado problemáticas significativas. Este último impide el acceso al mar y produce malos olores debido a la liberación de amonio y ácido sulfhídrico durante su descomposición (Fragoso, 2021). En conjunto con otros factores, estas condiciones pueden provocar el desplazamiento de especies o modificaciones en la morfología de los pastos marinos como el tamaño o forma de la hoja (Quiroga, 2019; Chávez *et al.*, 2020; Álvarez-Rocha & Ortegón-Aznar, 2022). Asimismo, la presencia de organismos exóticos que se aclimatan y adaptan fácilmente a los cambios ambientales, ya sean naturales o antrópicos, representa otra amenaza (Horta *et al.*, 2019). Un ejemplo de ello son las esponjas, que han proliferado en zonas arrecifales al ocupar superficies coralinas deterioradas, aprovechando los nutrientes provenientes de ecosistemas costeros y el carbono orgánico disuelto (Pawlik *et al.*, 2018).

Los arrecifes coralinos constituyen uno de los ecosistemas más relevantes del Caribe, al ser hábitat de gran diversidad de especies y funcionar como barreras naturales contra la erosión costera. Sin embargo, su fragilidad frente al cambio climático, la contaminación y la presión turística, los convierte en sistemas altamente vulnerables (Siegel *et al.*, 2019). Dentro de estos ambientes se encuentran las

macroalgas, representadas por las divisiones Rhodophyta, Ochrophyta y Chlorophyta (Cuevas-Sánchez *et al.*, 2022). Además de ser productores primarios, algunas especies participan en la formación de ecosistemas como los arrecifes y sustratos. Varias de ellas son consideradas bioindicadoras de perturbación y contaminación por los ciclos biológicos cortos que presentan, siendo susceptibles a los cambios de nutrientes en la columna, por consiguiente, se refleja en la composición específica y abundancia de especies oportunistas (Mateo *et al.*, 2007; de Vasconcelos *et al.*, 2019). En contraste, los pastos marinos presentan menor diversidad en México, pero poseen gran relevancia ecológica y económica. Funcionan como trampas de carbono, zonas de crianza y reproducción para diversas especies de invertebrados y vertebrados, incluyendo crustáceos, moluscos, equinodermos y peces, asimismo, los pastos marinos proveen alimento a tortugas marinas y manatíes. Al igual que las macroalgas, son productores primarios de la zona costera y reguladores del cambio climático gracias a su capacidad de retener carbono, formando parte de los llamados ecosistemas de carbono azul (Herrera- Silveira *et al.*, 2019; Burguete, 2023).

Finalmente, los invertebrados marinos abarcan especies de los Phylum Porifera, Cnidaria, Mollusca, Anellida, Crustacea y Echinodermata, presentes en zonas arenosas, rocosas y charcos de marea, donde se clasifican como criptofauna y epifauna (Vassallo *et al.*, 2014). Estos organismos poseen importancia comercial en turismo (actividades relacionadas en la observación), consumo humano y ecológica, al participar en el reciclaje de nutrientes, regular la biomasa de otros organismos y

actuar como bioindicadode la lanzares (Sibaja-Cordero *et al.*, 2014; Genzáno *et al.*, 2014; Giménez & Torroglosa, 2014; Sabatini *et al.*, 2014).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar la biodiversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados que habitan la zona costera de la región noroeste de la isla de Cozumel, así como conocer si ha habido cambios en la composición taxonómica en los tres años de muestreo como resultado de las variables fisicoquímicas.

MARCO TEÓRICO

Las zonas costeras se distinguen por ser ambientes altamente dinámicos debido a la interacción de diversos ecosistemas, constituyendo la única región del planeta donde confluyen la tierra, la atmósfera, el mar y el agua dulce. Estos espacios ofrecen múltiples beneficios, tanto en términos de riqueza de especies como de valor económico (Silva *et al.*, 2017).

Las playas se definen como áreas que se extienden hacia el interior desde la línea de marea baja hasta el punto donde ocurre un cambio evidente en el material presente o donde la vegetación lo permite. Están conformadas principalmente por arenas, gravas o rocas (De la Lanza & Hernández 2014).

Las playas arenosas son entornos moldeados constantemente por procesos físicos como el oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos. Funcionan como hábitats para numerosos organismos del tipo poliquetos, moluscos, crustáceos y

equinodermos, entre otros, que han desarrollado adaptaciones específicas para sobrevivir en estas condiciones (González *et al.*, 2017).

Por otra parte, las playas rocosas constituyen hábitats estables en términos de tiempo y espacio, gracias a la persistencia del sustrato rocoso, sin embargo, las fuerzas de erosión provocadas por el impacto de las olas y la acción del viento pueden originar microcondiciones aisladas denominadas pozas de marea. Estos ambientes albergan organismos con adaptaciones eurihalinas y euritérmicas, ya que están influenciados por factores abióticos constantes como la amplitud de las mareas, el oleaje, la temperatura, la luz, la salinidad y la concentración de oxígeno disuelto (Hernández *et al.*, 2010; González *et al.*, 2017). Las pozas de marea, también llamadas charcas intermareales, son ecosistemas costeros singulares y dinámicos que se forman en la zona intermareal, aquella franja de tierra que queda expuesta durante la bajamar y se inunda en la pleamar debido a las variaciones periódicas del nivel del mar. Estas pozas se encuentran en costas de todo el mundo y desempeñan un papel fundamental en la vida e interacciones de los invertebrados marinos (Lobban & Harrison, 2000). Se originan en áreas rocosas con depresiones naturales que retienen agua de manera temporal. Su tamaño, forma y profundidad varían desde pequeñas charcas hasta piscinas más extensas, dependiendo de la composición del sustrato y de la exposición al oleaje y las corrientes (Ramírez, 2004). El funcionamiento de las pozas está regulado por el ciclo de las mareas, que provoca inundación y desecación alternadas. Durante la pleamar se llenan de agua marina, mientras que en la bajamar quedan expuestas, generando condiciones ambientales únicas con fluctuaciones de salinidad, temperatura, luz y disponibilidad

de nutrientes (Dawes, 1998). Estas características permiten que las pozas de marea alberguen una gran diversidad de organismos, como algas e invertebrados marinos. Los habitantes de estos ambientes han desarrollado adaptaciones para sobrevivir en condiciones cambiantes, tales como resistencia a la desecación, tolerancia a variaciones de salinidad y capacidad de aferrarse a sustratos rocosos bajo corrientes intensas. Además, las pozas funcionan como centros de actividad biológica y cumplen un papel crucial en la cadena trófica costera, al proporcionar áreas de cría, alimentación y refugio durante la marea baja, protegiendo a los organismos de depredadores (González-Murcia, 2020).

Los sedimentos constituyen depósitos finales de sustancias provenientes de la columna de agua y de aportes continentales, ofreciendo información valiosa sobre las interacciones en ambientes marinos y costeros. Estos sedimentos pueden contener nutrientes, compuestos orgánicos persistentes (como plaguicidas organoclorados, hidrocarburos del petróleo y pinturas antiincrustantes), patógenos y metales pesados (Cupul *et al.*, 2006; Váldez & Castillo, 2014).

El tamaño de grano de los sedimentos influye de manera significativa en su transporte y deposición, aportando datos sobre las corrientes y las zonas de acumulación. Asimismo, la textura de los sedimentos ofrece pistas sobre su origen y está directamente relacionada con la concentración de metales pesados y materia orgánica (Cupul *et al.*, 2006; Váldez & Castillo, 2014).

La materia orgánica presente en los sedimentos proviene de diversas fuentes, como restos de plantas y animales, y se clasifica en alóctona, antropogénica y autóctona.

Se estima que su concentración en ambientes marinos oscila entre el 0.5% y el 10%. En las zonas costeras, esta proporción suele rondar el 2.5%, mientras que en mar abierto se aproxima al 1%. El contenido de carbono orgánico en el suelo está estrechamente relacionado con la textura de los sedimentos, siendo más abundante en áreas dominadas por limos y arcillas (Calva *et al.*, 2006).

La principal diferencia entre el carbono acumulado en ecosistemas terrestres y el retenido en sedimentos costeros radica en el período de almacenamiento. En estos últimos, el carbono puede permanecer incluso miles de años, debido a que el suelo se encuentra saturado de agua, generando un ambiente anaeróbico que impide la oxidación microbiana y su liberación a la atmósfera. Además, los aportes de sedimentos son constantes y rápidos, lo que favorece una acumulación crónica de carbono con el paso del tiempo. Los ambientes costeros con mayor capacidad de retención de carbono orgánico son los manglares, marismas y pastos marinos, conocidos colectivamente como ecosistemas de carbono azul (Vázquez-Benavides *et al.*, 2024).

Los carbonatos se definen como sales derivadas del ácido carbónico, caracterizadas por la del ion carbonato (CO_3^{2-}). Son comunes en la naturaleza y se estima que la mayoría se originan en zonas poco profundas de la plataforma continental y en bancos arrecifales (Sánchez *et al.*, 2016).

En los océanos, el carbonato de calcio (CaCO_3) desempeña un papel esencial en el ciclo del carbono. Este compuesto cristaliza en dos formas minerales: aragonita y calcita, siendo esta última menos soluble y más estable desde el punto de vista

termodinámico. Su función principal consiste en la formación de estructuras rígidas en numerosos organismos, como los caparazones de crustáceos y las conchas de moluscos. Al morir estos organismos, dichas estructuras se acumulan en los sedimentos marinos (Cienfuentes *et al.*, 1986; Chieric y Fransson, 2009; Reimer y Rodríguez-Troncoso, 2014).

El cambio climático afecta la formación y asimilación de carbonatos por parte de los organismos que dependen de ellos, generando alteraciones en la química del agua, particularmente, en la acidificación oceánica. Este fenómeno produce impactos directos e indirectos: los primeros incluyen efectos sobre todos los ciclos de vida que requieren CaCO_3 , mientras que, los segundos, abarcan modificaciones en la disponibilidad y composición de nutrientes debido al incremento de la acidez (Raven *et al.*, 2005).

Los arrecifes de coral son ecosistemas de altísima biodiversidad y productividad, albergando cerca de un tercio de todas las especies marinas conocidas. Se localizan en regiones tropicales, en aguas con baja concentración de nutrientes y a profundidades menores de 50 metros (Fisher *et al.*, 2015). Los corales, invertebrados marinos pertenecientes al Phylum Cnidaria, se dividen en dos grupos: los octocorales o corales blandos, y los corales hermatípicos o corales duros. Estos últimos poseen la capacidad de formar esqueletos de carbonato de calcio y su reproducción asexual favorece el crecimiento de las colonias (Sheppard *et al.*, 2010; Veron, 2011).

La producción de carbonatos representa un proceso energéticamente costoso para los corales. Por ello, han desarrollado una asociación simbiótica con dinoflagelados del Género *Symbiodinium* sp. Gert Hansen & Daugbjerg, conocidos como zooxantelas. Estos microorganismos proporcionan a los corales su coloración, compuestos energéticos y oxígeno, además de contribuir a la eliminación de CO₂, fosfatos y nitratos, favoreciendo la formación del esqueleto calcáreo (Walther-Mendoza *et al.*, 2016).

Los arrecifes coralinos pueden mantenerse en dos estados estables: uno dominado por corales duros y otro por macroalgas (van de Leemput *et al.*, 2016). La cobertura de corales vivos en el sustrato se utiliza como indicador de la salud del arrecife y como bioindicador general. No obstante, se ha observado una disminución en dicha cobertura, asociada a presiones antropogénicas y naturales que generan estrés y conducen a la mortalidad coralina. Este deterioro se vincula principalmente con el cambio climático y las actividades humanas (Cresswell *et al.*, 2023).

Las macroalgas carnosas son los principales competidores de los corales y pueden ocasionar su muerte mediante crecimiento excesivo, al generar sombra que limita su desarrollo e impide el asentamiento de larvas coralinas (Perry *et al.*, 2014). El desequilibrio entre corales y macroalgas se inclina hacia un incremento de estas últimas, favorecido por el aumento de nutrientes, el incremento de la temperatura y la sobreexplotación de herbívoros, lo que contribuye al deterioro de las comunidades coralinas (Cinner *et al.*, 2013).

Las macroalgas desempeñan un papel ecológico fundamental: son productores primarios, proporcionan refugio y alimento a invertebrados y peces, fijan el sustrato y aportan macro y micronutrientes al medio. Su desarrollo depende de factores abióticos como la radiación lumínica, la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes y el tipo de sustrato. Las principales divisiones son Chlorophyta, Rhodophyta y Ochrophyta (Patiño- Espinoza *et al.*, 2022).

Chlorophyta (algas verdes): grupo morfológicamente diverso que incluye organismos unicelulares, filamentosos y pseudoparenquimatosos, algunos de gran tamaño. Se dividen en tres clases: *Chlorophyceae* (la más extensa), *Prasinophyceae* (unicelulares móviles y flagelados, principalmente marinos) y *Charophyceae* (algas de agua dulce y salobre con talos pseudoparenquimatosos). Presentan clorofila *a* y *b*, xantófilas como pigmentos accesorios y sustancias de reserva similares al almidón (Dawes, 1986; Mansilla & Alveal, 2004; Pedroche & Senties, 2020).

Ochrophyta: caracterizadas por células reproductoras flageladas (heterokontas). Son comunes en mares fríos y presentan formas filamentosas o parenquimatosas que pueden alcanzar hasta 100 metros de altura. Contienen clorofila *a* y *c*, fucoxantinas como pigmento accesorio y laminarina como sustancia de reserva. Su reproducción puede ser por zoosporas móviles, aplanósporas inmóviles o fusión de gametos (Dawes, 1986; León & Núñez, 2017).

Rhodophyta (algas rojas): consideradas las más abundantes en ambientes marinos. Predominan las formas filamentosas y pseudoparenquimatosas, aunque existen

géneros unicelulares. Contienen clorofila *a*, además de pigmentos accesorios como r-ficoeritrina y r-ficocianina. Se dividen en dos clases: *Bangiophyceae* (formas simples, unicelulares o filamentosas con fases sexuales desconocidas) y *Florideophyceae* (organismos filamentosos o pseudoparenquimatosos con ciclos de vida trifásicos). Son principalmente bentónicas y abundan en zonas ecuatoriales (Dawes, 1986; Mansilla & Alveal, 2004; Senties & Dreckmann, 2014).

En México, la diversidad de macroalgas se estima en 1,698 taxones: 18.3% Chlorophyta, 14% Phaeophyceae y 67.6% Rhodophyta. De estos, 239 son comunes tanto en el Pacífico como en el Atlántico. La mayor diversidad se encuentra en el Pacífico (1,183 especies) frente al Atlántico (754 especies), siendo las Rhodophyta las más abundantes (Pedroche & Senties, 2020).

Los pastos marinos constituyen ecosistemas altamente productivos que albergan gran diversidad de especies (Millán *et al.*, 2024). Estas fanerógamas sumergidas, pertenecientes al orden Alismatales, se distribuyen en costas templadas y tropicales, incluyendo lagunas costeras, estuarios, esteros, zonas intermareales y fondos infralitorales. A diferencia de las algas, producen flores y semillas, siendo las únicas plantas acuáticas adaptadas a vivir completamente sumergidas en agua salada (Herrera-Silveira *et al.*, 2019).

Se desarrollan en aguas poco profundas donde reciben suficiente luz para realizar fotosíntesis y forman praderas marinas, que pueden ser monoespecíficas o poliespecíficas. Cumplen funciones ecológicas clave: estabilizan el sustrato con sus raíces, capturan y almacenan carbono (ecosistemas de carbono azul), reciclan

nutrientes mejorando la calidad del agua y sirven como hábitat, refugio y fuente de alimento para crustáceos, moluscos, peces, reptiles y mamíferos (Herrera-Silveira *et al.*, 2019).

En México, la principal problemática es la modificación y destrucción de estos hábitats por cambios en el uso del suelo, contaminación por descargas de aguas residuales y efectos del cambio climático. Estas amenazas provocan la pérdida de biodiversidad asociada, lo que hace urgente su conservación. A nivel mundial se han registrado 72 especies de pastos marinos, mientras que en México se han identificado alrededor de 11 (Lot & Ramírez, 2008; Herrera-Silveira *et al.*, 2019).

La diversidad de invertebrados marinos en México es amplia, definida por la ausencia de columna vertebral en estos organismos. Esta riqueza biológica se explica porque la vida surgió en el mar, y los invertebrados abarcan la mayoría de los grupos animales, con tamaños que van desde microscópicos hasta varios metros (Calcagno, 2014). Habitan en todos los océanos, desde las profundidades hasta la zona intermareal de playas rocosas y arenosas. Entre los grupos más representativos se encuentran los Phylum Porifera, Cnidaria, Annelida, Mollusca, Arthropoda (Subphylum Crustacea) y Echinodermata. Se estima que la diversidad mundial alcanza unas 250,000 especies, aunque podría llegar a 10 millones con nuevos registros en zonas profundas de difícil acceso (Ríos *et al.*, 2017). En el Pacífico sur de México se han contabilizado alrededor de 2,600 especies (Bastida & García, 2022).

El Phylum Porífera (esponjas marinas) agrupa a organismos sésiles y pluricelulares que carecen de verdaderos tejidos. Se alimentan a través de un sistema filtrador que consta de un sistema de poros y tubos, ayudados por células llamadas coanocitos. Poseen esqueletos de espículas cristalizadas, calcáreas o silíceas con colágeno diversamente modificado y realizan digestión intracelular. La reproducción asexual ocurre mediante gemación o gémulas, mientras que la reproducción sexual involucra óvulos y espermatozoides. Habitan en áreas que van desde las zonas intermareales hasta los 60 metros de profundidad y se han descrito alrededor de 5,000 especies (Marshall & Williams, 1985; Hickman *et al.*, 2009). La fauna de esponjas en México se estima en 517 especies (considerando únicamente la clase Demospongiae); 292 para el Atlántico mexicano y 138 para el Pacífico mexicano (Carballo *et al.*, 2014)

El Phylum Cnidaria (corales, anemonas, medusas, cubomedusas, hidras y sifonóforos) incluye aproximadamente 9,000 especies, que van desde antozoos, estuariozoos, escifozoos, cubozoos e hidrozoos. Algunos de estos organismos, como los corales, son considerados los arquitectos de los fondos marinos porque construyen arrecifes de coral. Los cnidarios poseen cnidocitos, simetría radial o birradial y se dividen en dos tipos de individuos: los pólipos y las medusas. Realizan digestión extracelular en la cavidad gastrovascular y digestión intracelular en las células de la gastrodermis. Se reproducen asexualmente por gemación en los pólipos y sexualmente mediante gametos en todas las medusas y algunos pólipos. No poseen órganos excretores ni respiratorios (Brusca, 2003; Hickman *et al.*, 2009; Lazcano-Pérez *et al.*, 2020).

Tradicionalmente, el Phylum Annelida se dividía en las clases Polychaeta, Oligochaeta e Hirudinea. Sin embargo, estudios filogenéticos basados en evidencia molecular demostraron que Polychaeta constituye un grupo parafilético, debido a que los clitelados (Clitellata) se originaron dentro de los anélidos tradicionalmente considerados poliquetos. Por ello, las clasificaciones recientes ya no reconocen a Polychaeta como una clase formal, sino que agrupan a la mayoría de los anélidos marinos en los clados Errantia y Sedentaria (Brusca *et al.*, 2023).

El Phylum Mollusca está representado por la clase Bivalvia (almejas y ostras), Gasteropoda (caracoles) y Cephalopoda (calamares, sepias y pulpos). Los moluscos presentan simetría bilateral y su forma es generalmente ovoide. Tienen un pie muscular en su superficie ventral y, en su mayoría, una concha que protege sus órganos internos. Los ctenidios son branquias presentes en la mayoría de los moluscos bentónicos. Poseen una rádula, que es una estructura quitinosa utilizada para alimentarse. Los moluscos son uno de los grupos de invertebrados más diversos y en México se han registrado alrededor de 4,643 especies (Castillo-Rodríguez, 2014).

El Subphylum Crustacea incluye a algunos de los artrópodos más conocidos, como cangrejos, camarones, langostas y langostinos. En su mayoría son marinos, aunque también existen representantes dulceacuícolas y terrestres. Presentan una cabeza uniforme en todo el Subphylum, con cinco pares de apéndices. El tronco varía entre grupos, pero la mayoría de los crustáceos posee una cutícula compuesta de quitina, proteína y material calcáreo. Cuentan con un sistema circulatorio abierto y realizan

la muda o ecdisis para aumentar su tamaño corporal. En México, se han registrado aproximadamente 1,597 especies de crustáceos marinos, con un 46.7% en aguas del Pacífico y un 31.4% en el Atlántico (Álvarez *et al.*, 2014).

El Phylum Equinodermata engloba a animales marinos como asteroideos, ofiurideos, equinoideos, holoturoideos y crinoideos. Todos estos organismos tienen un endoesqueleto calcáreo espinoso, simetría radial y se mueven por pies ambulacrales o mediante movimientos de espinas o brazos. Poseen sexos separados o pueden ser hermafroditas. Ciertos grupos presentan branquias dérmicas, pies ambulacrales, árboles respiratorios o sacos especializados para la respiración. En total, se conocen alrededor de 9,000 especies de equinodermos (Hickman *et al.*, 2009). En México se encuentran 643 especies de equinodermos, siendo la clase Ophiuroidea la más rica con 197 especies, Asteroidea contiene 185, Echinoidea 119, Holothuroidea 113 y Crinoidea 29 (Solís *et al.*, 2014).

Los invertebrados marinos son relevantes tanto comercial como ecológicamente. Algunos se utilizan como alimento, mientras que otros cumplen funciones esenciales en los ecosistemas, como el control de poblaciones de macroalgas y otros invertebrados (Calcagno, 2014).

La contaminación marina se ha convertido en un problema grave, lo que ha impulsado el uso de especies bioindicadoras para evaluar la calidad del agua. Estos organismos reflejan el estado de salud de los ecosistemas debido a su sensibilidad y comportamiento. Deben cumplir criterios como amplia distribución, abundancia,

sedentarismo y tolerancia a contaminantes sin sufrir efectos letales (Luna *et al.*, 2023).

En ambientes costeros, diversas especies bentónicas se emplean como bioindicadores de contaminación. Por ejemplo, macroalgas de los órdenes Ulvales, Fucales y Laminariales son consideradas especies longevas u oportunistas frente a las condiciones fisicoquímicas del agua (Soto *et al.*, 2021). Asimismo, especies como *Ulva intestinalis* Linnaeus, *Bostrychia pinata* J.Tanaka & Chihara y el pasto marino *Ruppia marítima* Linnaeus son útiles como bioindicadores de hidrocarburos aromáticos policíclicos (Calva-Benítez & Torres-Alvarado, 2008).

En el caso de los invertebrados, los bivalvos destacan como bioindicadores por su capacidad de filtrar grandes volúmenes de agua y acumular contaminantes en sus tejidos. Esta característica permite detectar xenobióticos y evaluar sus efectos. Además, su naturaleza sedentaria facilita el análisis espaciotemporal de las alteraciones ambientales (Ortiz & Ortega, 2014).

ANTECEDENTES

En el Caribe mexicano se han realizado diversos estudios sobre la diversidad florística de macroalgas. Mendoza-González y Mateo-Cid (1992) determinaron 229 especies en Isla Mujeres, Quintana Roo, clasificadas en 122 Rhodophyta, 22 Phaeophyceae y 74 Chlorophyta. Posteriormente, Mendoza-González y Mateo-Cid (2007) reportaron cinco especies nuevas de Rhodophyta para la región.

Rodríguez-Martínez *et al.* (2021) analizaron las implicaciones de los arribazones de sargazo en la anidación de tortugas marinas en el Caribe mexicano. Chuc-Contreras *et al.* (2012) estudiaron el cambio coral-algas en la laguna arrecifal de Mahahual, observando predominio de cianofíceas. González-Solis y Torruco (2015) evaluaron la relación entre variables fisicoquímicas y macroalgas en la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro, registrando 21 especies. Asimismo, Cetz *et al.* (2008) documentaron cuatro nuevas especies de macroalgas para el Atlántico mexicano en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak (PNAX). Patiño-Espinosa (2022) estableció la diversidad alfa, beta y gamma de macroalgas en Quintana Roo, obteniendo 61 taxones, principalmente Rhodophyta.

En cuanto a invertebrados, Laguarda-Figueras *et al.* (2002) analizaron la distribución de asteroideos y registraron 46 especies en el Caribe mexicano. Laguarda-Figueras *et al.* (2005) revisaron colecciones y reportaron 178 taxa de equinodermos. Mateo *et al.* (2003) estudiaron la cobertura coralina afectada por blanqueamiento y su relación con macroalgas en el centro-sur de Quintana Roo.

En la isla de Cozumel, Mateo-Cid y Mendoza-González (1991) elaboraron un listado florístico con 281 taxa de macroalgas (167 Rhodophyta, 35 Phaeophyceae y 79 Chlorophyta). Mendoza *et al.* (2000) identificaron 23 Phaeophyceae y 72 Chlorophyta, con nuevos registros para la isla. Posteriormente, Mateo-Cid y Mendoza-González (2007) realizaron una revisión bibliográfica y de herbario, determinando 403 taxa (209 Rhodophyta, 44 Phaeophyceae y 102 Chlorophyta), sin embargo, estos estudios agregaron organismos que habían sido colectados

únicamente en Cozumel, tomaron en cuenta registros de Yucatán y Campeche, por ejemplo. González *et al.* (2018) examinaron la cobertura de macroalgas en arrecifes de coral del Caribe, Sonda de Campeche y Belice, registrando 15 especies en Cozumel. Rioja *et al.* (2012) evaluaron los efectos del huracán *Emily* en la isla, observando una rápida recuperación de macroalgas. Carranza-Ramírez *et al.* (2023) identificaron 42 taxa de macroalgas (5 Ochrophyta, 12 Rhodophyta y 25 Chlorophyta), analizando su afinidad con el sustrato.

Respecto a pastos marinos, Green y Short (2003) elaboraron un atlas global que incluye su distribución en el Caribe. Arias-González y Briones-Fourzán (2005) destacaron su importancia ecológica y las amenazas antropogénicas en la región. Lot y Ramírez (2008) identificaron tres especies en la zona oeste de Cozumel mediante revisión bibliográfica y de herbario. Álvarez-Filip *et al.* (2013) estudiaron la dinámica de los pastos marinos y su relación con la salud de los arrecifes coralinos. Wong y Tussenbroek (2022) Indicaron la presencia de tres especies de pastos marinos en la isla de Cozumel, mencionan parte de los riesgos que hay en la isla para las comunidades de pastos como el aporte de nutrientes y arribazones de sargazo.

En cuanto a invertebrados marinos, Campos-Vázquez, (2000) identificó 148 taxa de Isopoda, Amphipoda y Decapoda asociados a macroalgas. Maas y Bahema (2008) describieron 11 especies de esponjas presentes en la isla. Mejía *et al.* (2008a) enlistaron 140 especies de crustáceos decápodos y en otro trabajo (2008b), describieron una nueva especie de decápodo para Cozumel. Solís-Marín y Laguarda (2008) registraron 81 especies de equinodermos, de las cuales 11 fueron

nuevos registros. Millet y Álvarez (2008) reportaron el primer registro de *Ophiura ljungmani* en la isla. Lozano *et al.* (2020) identificaron 62 especies de moluscos en sustratos arenosos (51 gasterópodos y 11 bivalvos).

En relación con los arrecifes coralinos, Estrada-Sladívar *et al.* (2021) estudiaron los efectos de la enfermedad “pérdida de tejido de coral duro” (SCTLD) en Cozumel, observando una rápida propagación en dos meses, con pérdida del 46% de la cobertura coralina y reemplazo por macroalgas. Torruco *et al.* (2021) analizaron la distribución de corales escleractinios en el Golfo de México y Caribe, registrando 62 taxa y una disminución en abundancia. Dentro del PNAC, Cruz (2017) caracterizó el paisaje bentónico durante 11 años, encontrando una tendencia hacia la homogenización. Cruz y Nieto (2018) utilizaron imágenes multiespectrales para evaluar paisajes bentónicos, observando variaciones diferenciales en el tiempo. Finalmente, CONANP (2016) implementó un programa de protección de flora y fauna en la zona norte de Cozumel, aportando información sobre los recursos naturales presentes.

JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se centra en el estudio de las comunidades bentónicas, específicamente macroalgas, pastos e invertebrados marinos, en la zona noroeste

de la isla de Cozumel. La importancia de analizar y determinar las especies presentes en esta zona radica en que la comunidad bentónica es dinámica y altamente sensible a las variaciones en las condiciones fisicoquímicas. Los organismos que la habitan responden de manera directa a estos cambios, lo que la convierte en un indicador relevante de la calidad ambiental. En años recientes, se han registrado alteraciones significativas, entre ellas las ocasionadas por los arribazones masivos de sargazo en la isla. Estas masas de sargazo generan afectaciones al eutrofizar la columna de agua lo que incrementa la proliferación de bacterias hongos y virus, induce el establecimiento de poblaciones ajenas y/u oportunistas cambiando la composición de la riqueza de especies, reduce la transparencia, aumentar la concentración de taninos y liberar ácido sulfhídrico en el agua, lo que provoca la muerte de la flora y fauna en estas áreas afectadas (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020).

Otro factor para considerar es la cercanía de la zona estudiada a tres lagunas costeras: la laguna de la Pasión, la laguna Río de la Plata y la laguna La Ciega, ubicadas al norte de la isla. Estas lagunas están rodeadas de manglares que aportan una gran cantidad de nutrientes a las zonas cercanas (Servicio de Información sobre Sitios Ramsar, 2009; Rodríguez *et al.*, 2013). Además, en la laguna "La Ciega" se encuentra una planta de tratamiento de aguas residuales que recientemente fue ampliada para sostener una capacidad de tratamiento de 230 l/s (Gobierno del Estado de Q. Roo, 2025).

Un punto relevante para llevar a cabo este trabajo es que, a la fecha, no hay estudios previos de sobre biodiversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados

marinos, ni de otro tipo en esta zona costera de la isla, por lo que es un estudio base e integrativo. El trabajo más cercano al área de estudio se realizó en una playa denominada "San Juan" por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991), donde se llevó a cabo un listado florístico de las macroalgas de la isla. Asimismo, se dispone de información, tanto antes como después, del confinamiento debido a la pandemia de la COVID-19. Lo que provocó que los cruceros turísticos no arribaran a la isla desde abril de 2020 hasta mayo de 2021 (APIQROO, 2024),

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es la diversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados que existe en la zona noroeste de la isla de Cozumel?
- ¿Ha habido cambios en la composición de macroalgas, pastos marinos e invertebrados a través de los años?
- ¿Existe una relación entre las macroalgas, pastos marinos e invertebrados con las variables ambientales?
- ¿Hay presencia de especies de macroalgas bioindicadoras de contaminación en el área de estudio?

HIPÓTESIS

Si la diversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel han experimentado cambios temporales asociados a variaciones ambientales y a la influencia antropogénica, entonces, se habrá favorecido la presencia de especies oportunistas y bioindicadoras de contaminación en los sitios más perturbados.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la biodiversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las especies de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en la zona arenosa, zona rocosa y charcos de marea de la zona noroeste de la isla de Cozumel.
- Evaluar las variables fisicoquímicas (pH, salinidad, OD, temperatura y profundidad).
- Analizar la textura de los sedimentos, su contenido de CO y carbonatos.
- Relacionar las variables fisicoquímicas (pH, salinidad, OD, temperatura y profundidad) y variables sedimentarias (textura de sedimentos, contenido de CO y carbonatos) con la presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Cozumel, en el estado de Quintana Roo, en la costa noroeste de la isla. Los límites geográficos de la isla son 20° 29'02.93'' y 20° 14' 27.02''N y 86° 53'11.54'' y 87° 03'32.07''W, lo que abarca un área marina terrestre total de 11,987 hectáreas. Esta región alberga una gran diversidad de especies de flora y fauna, siendo los corales uno de los elementos más representativos. En conjunto con Banco Chinchorro, el litoral de Quintana Roo y Yucatán, forman la reserva coralina más grande de México (INECOL, 1998).

Frente al área de interés se encuentra el canal de Cozumel, limitado por la isla de Cozumel y la península de Yucatán. Debido a su ubicación, este canal permite el paso de corrientes marinas de sur a norte, originadas por la desviación del flujo de la corriente de Yucatán. Estas corrientes transportan agua caliente al Golfo de México (Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019a).

En la zona norte de la isla, se encuentran lagunas costeras, como la Laguna Ciega, Laguna Montecristo y Laguna de la Plata, rodeadas por extensos manglares que albergan las cuatro principales especies de mangle presentes en México: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erecta*. Esta área ha sido designada como sitio Ramsar (Ramsar, 2009) debido a su importancia ecológica y su contribución de nutrientes a los arrecifes cercanos (Rodríguez *et al.*, 2013).

Los arrecifes de la isla se dividen en arrecifes de borde y de plataforma y albergan una variedad de especies, incluyendo corales como *Montastrea annularis*, *Porites astreoides* y *Diploria*, *Colpophyllia*, y *Agaricia*. Además, se encuentran esponjas, cnidarios, poliquetos, moluscos, crustáceos y equinodermos (INECOL, 1998). El clima de la región es cálido y húmedo, con abundantes lluvias en verano y una temperatura media anual de 25.5°C, con máximas de 39°C y mínimas de 20°C. La precipitación media anual alcanza los 1570 mm (CONANP, 2016).

La principal actividad económica en Quintana Roo es el sector terciario, que contribuye con el 86.6% del Producto Interno Bruto (PIB) estatal (INEGI, 2016). En Cozumel, el turismo de cruceros desempeña un papel fundamental (Santander *et al.*, 2012). La isla ocupa el primer lugar a nivel mundial como destino de estas embarcaciones, recibiendo un promedio de 3.8 millones de pasajeros de cruceros al año. Las principales líneas que operan en la zona son *Carnival Cruises* y *Royal Caribbean*, con embarcaciones que tienen capacidad para entre 4000 y 6000 pasajeros (Fernández-Rodríguez *et al.*, 2018). Sin embargo, la llegada de cruceros se vio drásticamente afectada en 2020 debido a la pandemia de la COVID-19, con solo 374 arribos en ese año. En 2021, hubo 353 arribos y hasta noviembre 2024 se han reportado 1053 (APIQROO, 2024)

La isla de Cozumel es un destino turístico popular por la variedad de actividades disponibles, como el snorkel, el buceo, los recorridos en embarcaciones y una amplia gama de actividades recreativas no motorizadas, como velero, kayak, canoísmo, paddling, kitesurf, boarding, windsurfing y surfing. Además, se ofrecen numerosas actividades terrestres para los visitantes (CONANP, 2019).

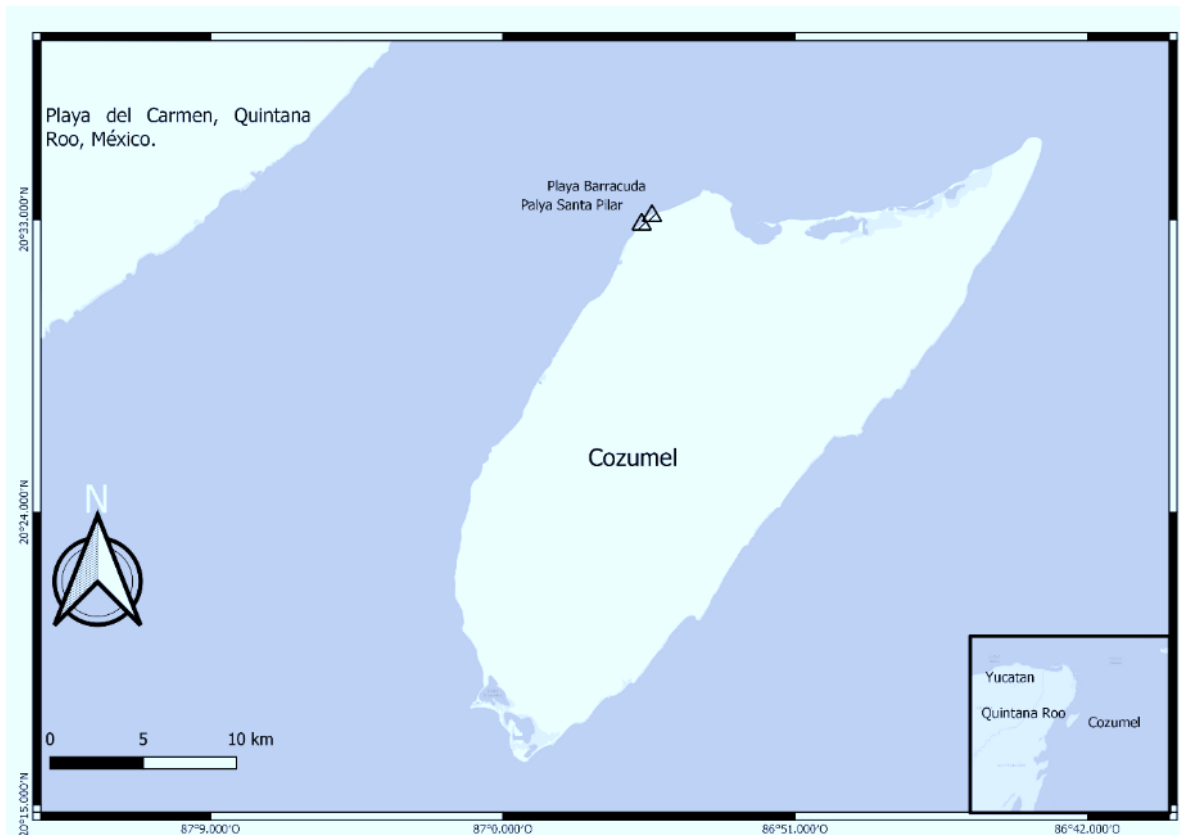


Figura 1. Localización del área de estudio en la isla de Cozumel, Q. Roo.

METODOLOGÍA

Muestreo

Los muestreos se llevaron a cabo en noviembre y octubre de 2018, en julio de 2022 y julio de 2023. Se establecieron un total de once estaciones de muestreo, que abarcaron desde playa Santa Pilar hasta playa Barracuda (Figura 1), cubriendo una distancia aproximada de 1,135 m a lo largo de la línea de costa. Estas estaciones incluyeron áreas con playas de arena, rocosas y pozas de marea (Figura 2).

En cada estación de muestreo, se registraron las coordenadas geográficas y se realizaron mediciones in situ de la profundidad, la temperatura y el oxígeno disuelto (OD) del agua utilizando un oxímetro de la marca YSI 55A0. La salinidad se midió con un salinómetro de inducción de la marca Beckman y el pH se determinó utilizando un potenciómetro de la marca Conductronic.

Tabla 1. Coordenadas y clasificación del tipo de playa correspondientes a las estaciones de muestreo en la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Estación	Coordenadas		Tipo de playa
<i>E1A</i>	20°33'15.00"N	86°55'12.00"O	Arenosa
<i>E1B</i>	20°33'21.24"N	86°55'14.36"O	Arenosa
<i>E2A</i>	20°33'14.34"N	86°55'17.06"O	Arenosa
<i>E3A</i>	20°33'13.07"N	86°55'21.45"O	Arenosa
<i>E3B</i>	20°33'15.15"N	86°55'22.57"	Arenosa
<i>E4A</i>	20°33'11.48"N	86°55'25.30"O	Arenosa
<i>E5A</i>	20°33'8.28"N	86°55'32.28"O	Arenosa
<i>E6A</i>	20°33'9.34"N	86°55'33.54"O	Mixta
<i>E6B</i>	20°33'7.30"N	86°55'32.42"O	Mixta
<i>E7A</i>	20°33'5.17"N	86°55'35.46"O	Mixta
<i>E8A</i>	20°33'4.00"N	86°55'37.00"O	Rocosa (Charco de marea)

Las muestras de sedimento para los análisis granulométricos, de carbonatos y de contenido de carbono orgánico fueron conseguidas de forma manual y se colocaron en bolsas de cierre hermético tipo zip (Ziploc). Se conservaron a una temperatura de 4°C en una hielera hasta llegar al laboratorio, donde se almacenaron en un congelador para su posterior análisis.

La recolección de material ficológico se realizó de manera manual con la ayuda de una espátula. Los organismos no se fijaron en formol al 4% debido a restricciones que existen para el envío por paquetería y transporte en avión, por consiguiente, se conservaron en un herbario para su transporte al laboratorio donde posteriormente se pasaron a otro herbario para su posterior identificación. Algunos especímenes se preservaron en seco utilizando sílica gel, para lo cual se requirió solo una muestra de un máximo de 2 cm de longitud. Se llevaron a cabo censos visuales mediante buceo libre. Se utilizaron transectos de banda de 20 metros de longitud por 2 metros de ancho. Durante estos censos, se tomaron fotografías y videos en alta definición del sustrato bentónico utilizando una cámara de video Garmín Virb XE. Lo que permitió la identificación de las especies de macroalgas y en especial de invertebrados sin necesidad de extraerlos, lo que contribuyó a la conservación de la fauna bentónica. Todas las muestras biológicas, así como las fotografías y los videos, fueron recolectados por la Dra. Laura Georgina Calva Benítez.

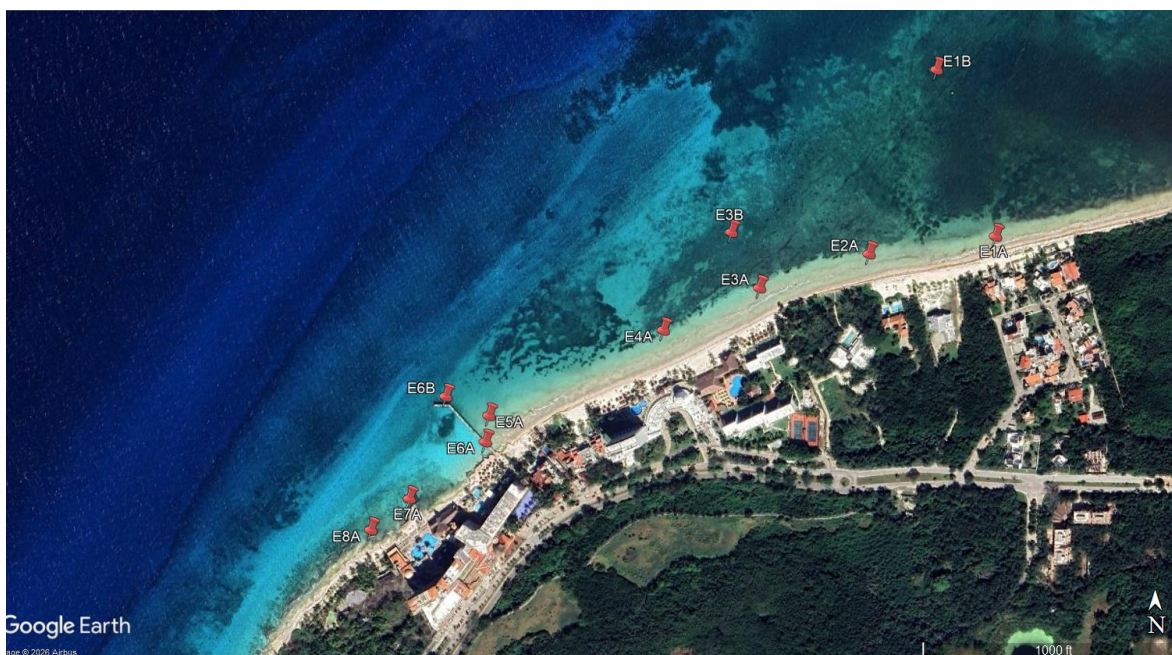


Figura 2. Localización de las estaciones en la zona noroeste de la isla de Cozumel, Q. Roo.

Métodos Analíticos

Textura de Sedimentos

Para la caracterización de la textura de los sedimentos, se utilizó el análisis granulométrico empleando diversos tamices con diferentes tamaños de malla *phi*. Esto permitió obtener desde gránulos hasta limo grueso, posteriormente se pesaron las fracciones obtenidas para obtener el porcentaje.

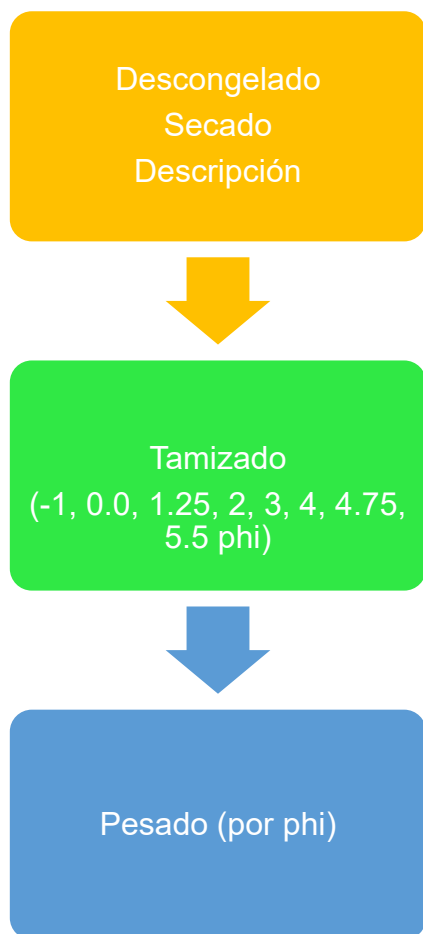


Figura 3. Carcterización de tamaño de grano por análisis granulométrico.

Determinación de Carbono Orgánico

Respecto al carbono orgánico, los sedimentos se dejaron secar temperatura ambiente y se tamizaron en una malla de 0.625 mm. Para el porcentaje de CO se empleó la técnica propuesta por Gaudette *et al.* (1974) que consiste en la titulación del exceso de dicromato de potasio con sulfato ferroso. Las muestras se analizaron por duplicado y se procesaron dos blancos de igual forma.

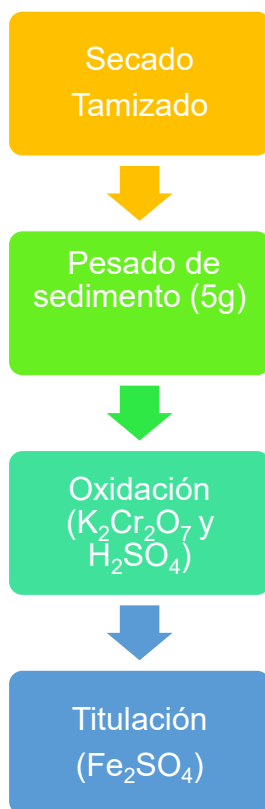


Figura 4. Determinación del porcentaje de carbono orgánico (Gaudette *et al.*, 1974).

Determinación de Carbonatos

La determinación de carbonatos se obtuvo con la técnica de digestión de carbonatos con HCl, consistió en agregar a una alícuota de sedimento, ácido Clorhídrico al 15% con la finalidad de disolver todos los carbonatos. Enseguida se lavó con agua destilada, después se escurrió, evitando la pérdida de partículas. Estos pasos se realizaron hasta que ya no hay reacción ante el HCl. Por último, se realizó la diferencia de peso inicial y final para obtener el porcentaje.

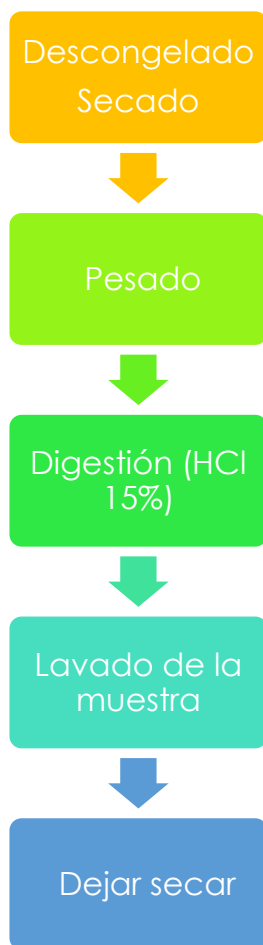


Figura 5. Determinación del porcentaje de carbonatos a través del método de digestión (Twenhofel & Tyler, 1941).

Identificación de Organismos

Macroalgas

Para la identificación de macroalgas, se empleó un microscopio binocular de la marca Leica. La determinación de las especies de macroalgas se llevó a cabo utilizando especímenes fijados o preservados en sílica gel y/o en seco, junto con las fotografías y videos tomados en el campo. Se utilizaron claves y guías de

identificación taxonómica, así como descripciones de referencia, para determinar la clasificación taxonómica de los organismos: Walton (1948); Schneider y Searles (1991); Schneider y Searles (1991); Littler y Littler (2000; Mateo-Cid y Mendoza-González (2007); Paul Humann y Ned De Loach (2013); Robinson *et al.* (2012); Mendoza-González *et al.* (2014); Acosta *et al.* (2018); Humann y Deloach (2013); Carranza-Ramirez *et al.* (2023).

Pastos marinos

Para la identificación de pastos marinos, se empleó un microscopio binocular de la marca Olympus. Mientras que la determinación de las especies pastos marinos se realizó mediante la utilización de especímenes fijados o preservados en sílica gel y/o en seco, junto con las fotografías y videos tomados en el campo. Se utilizaron claves y guías de identificación taxonómica, así como descripciones de referencia, para determinar la clasificación taxonómica de los especímenes, por ejemplo: Littler y Littler (2000); Humann y Deloach (2013b); van Tussenbroek (2015).

Invertebrados

Para la determinación de invertebrados, únicamente se utilizaron las fotografías y videos tomados en campo porque son los únicos materiales disponibles para identificar las especies de invertebrados debido a que no está permitida su recolección en la zona, entonces, se emplearon claves y guías de identificación taxonómica, así como descripciones de referencia, para determinar la clasificación taxonómica de los organismos, por ejemplo, la guía ilustrada básica para la identificación de los invertebrados marinos (Botero, 2017); Coral diversity and

disease in Mexico (Ward *et al.*, 2006); Reef creature identification: Florida, Caribbean, Bahamas (Humann *et al.*, *et al.*, 2013); WORMS (2023); Caribbean Reef Life: A Field Guide for Divers. 4th edition. (Charteris, 2017); Echinoderm diversity in the Caribbean Sea (Álvarado, 2011); Current knowledge of echinoderms (Echinodermata) from the coast of Paraíba, northeastern Brazil (Gondim *et al.*, 2022); A taxonomic guide to the brittle-stars (Echinodermata, Ophiuroidea) from the State of Paraíba continental shelf, Northeastern Brazil (Gondim *et al.*, 2013).

Análisis estadísticos

Parámetros ambientales

Se realizó un análisis de varianza para evaluar la existencia de diferencias significativas de las variables ambientales y sedimentarias entre años, meses y estaciones. Previamente, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Cuando ambas condiciones fueron satisfechas, se aplicó una prueba F ; en caso contrario, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis (H). Para el pH, específicamente, se empleó una prueba F con el fin de corroborar la igualdad de varianzas y, posteriormente, una prueba t tras analizar su comportamiento.

Asimismo, se construyó una matriz de correlación de Spearman, debido a que los datos no presentaron normalidad ni homocedasticidad en las variables correlacionadas. Este análisis permitió identificar las relaciones entre las variables fisicoquímicas del agua y las propiedades sedimentarias a lo largo del tiempo.

Información y análisis biológicos

En cuanto a los análisis de diversidad, se determinaron dos métricas: 1) la diversidad alfa, basada exclusivamente en la riqueza específica registrada en cada periodo de muestreo y en el conjunto total de los tres muestreos. 2) la diversidad beta, estimada mediante el índice de similitud de Jaccard para comparar diferencias entre años y entre los tipos de hábitat (zona arenosa, zona mixta y pozas de marea). Ambos análisis se realizaron para macroalgas, pastos marinos e invertebrados. Se aplicó una prueba de chi cuadrada (ji-cuadrada) para evaluar si el tipo de hábitat influyó en la presencia de estos grupos biológicos.

Finalmente, se ejecutó un Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) para evaluar las similitudes entre estaciones en función de la presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados, así como su relación con algunas variables fisicoquímicas y sedimentarias. Este análisis se interpretó únicamente cuando el valor de *stress* fue menor a 0.2.

Para los hábitos alimentarios, se empleó una clasificación para los invertebrados dividida en seis categorías, dichas categorías se seleccionaron a partir de literatura existente (Nasi *et al.*, 2017; Ocaña & Pech, 2018; Fu *et al.*, 2024; Putra *et al.*, 2024). Se buscó información a partir de literatura publicada en libros y artículos especializados sobre los dos principales hábitos alimentarios de cada especie de invertebrados marinos identificados (Fauchald & Jumars, 1979; Kaas & Van Belle,

1985;; Calva, 2002a; Calva, 2002b.; Uriz, *et al.*, 2003; Humann, & DeLoach. 2013a; Humann, & DeLoach. 2013b; Charteris, 2017).

La clasificación se definió en las siguientes categorías: Filtrador de partículas suspendidas, Planctívoro, Herbívoro, Detritívoro, Carnívoro y Omnívoro. Por consiguiente, se ejecutó un análisis de conglomerados para obtener las categorías que compartían un mayor número de especies. También se realizó un análisis de componente principales (ACP) sobre la relación entre las estaciones y los hábitos alimentarios de los invertebrados marinos.

RESULTADOS

Variables ambientales de agua

Temperatura

La temperatura promedio del agua fue de 29.1 °C (25.5 °C – 33.9 °C) (Figura 6). En el año 2018, la temperatura mínima (27 °C) se registró en las estaciones E7A y E8A durante octubre, mientras que la máxima (30 °C) se presentó en las estaciones E1A y E4A en noviembre. En 2022, la temperatura osciló entre 25.5 °C en la estación E5A y 30 °C en las estaciones E1A y E4A. En 2023, la mínima (29.4 °C) se observó en la estación E8A y la máxima (32.6 °C) en la estación E3B.

La temperatura mostró diferencias significativas entre los años (Tabla 2) y meses de muestreo (Tabla 3), de acuerdo con el análisis de Bonferroni. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre las estaciones de muestreo (Tabla 4).

Asimismo, el análisis NMDS evidenció una relación inversa con la salinidad (Figura 32).

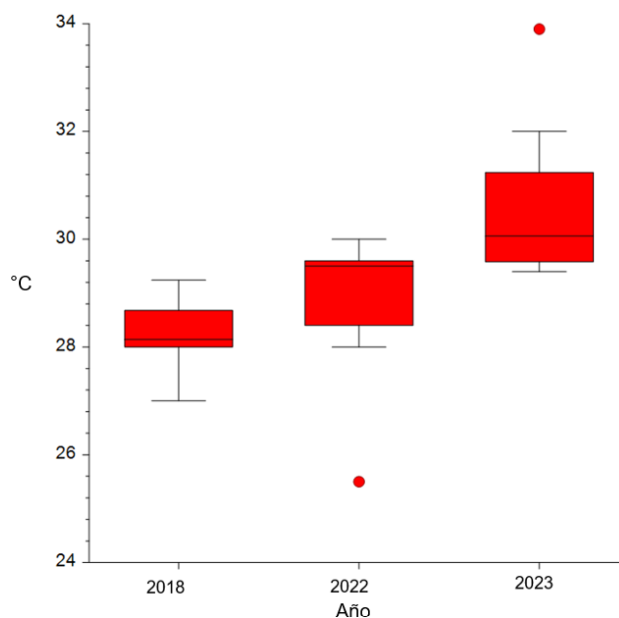


Figura 6. Temperatura del agua en las estaciones de muestreo a través de los años de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Profundidad

La media de la profundidad de muestreo fue de 1.86 m (0.1 m – 6 m) (Figura 7). Se observó que, en 2018, las estaciones con menor profundidad fueron E2A, E3A y E8A, mientras que las de mayor profundidad correspondieron a E6A y E7A. En los muestreos de 2022 y 2023, la menor profundidad se registró en las estaciones E7A y E8A, mientras que la mayor se presentó en la estación E6B.

No se detectaron diferencias significativas entre las profundidades de los años (Tabla 2), meses (Tabla 3) y estaciones de muestreo (Tabla 4).

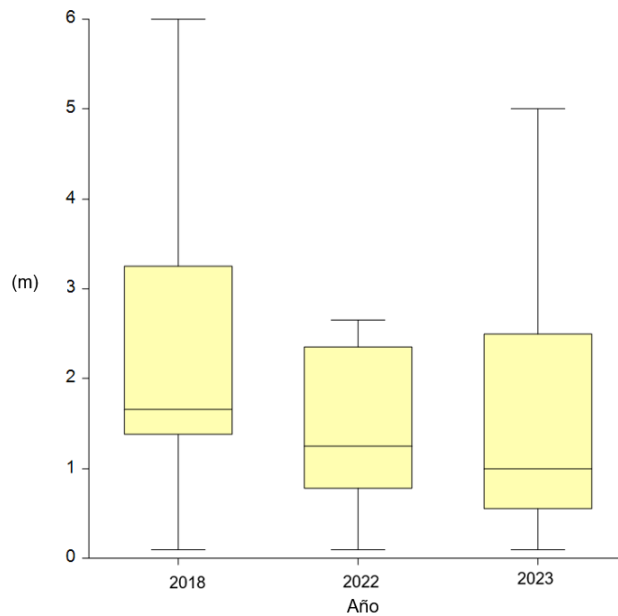


Figura 7. Variación de la profundidad en las estaciones de muestreo de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Salinidad

Se registró una salinidad promedio de 34.1 UPS (32.5 – 38 UPS) (Figura 8). En el muestreo de 2018, el valor mínimo (33 UPS) se presentó en la estación E4A durante octubre, mientras que el máximo (38 UPS) se observó en la estación E8A en el mismo mes. En 2022, la estación E1A mostró el menor valor (32.4 UPS), mientras que la estación E8A alcanzó el valor más alto (35.5 UPS). Para el muestreo de 2023, el mínimo de salinidad (33.3 UPS) se reconoció en la estación E6A y el máximo (35 UPS) en la estación E1B.

No se detectaron diferencias significativas en la salinidad entre los años (Tabla 2), meses (Tabla 3) y estaciones de muestreo (Tabla 4). De manera similar, el análisis NMDS evidenció una relación inversa con la temperatura (Figura 32).

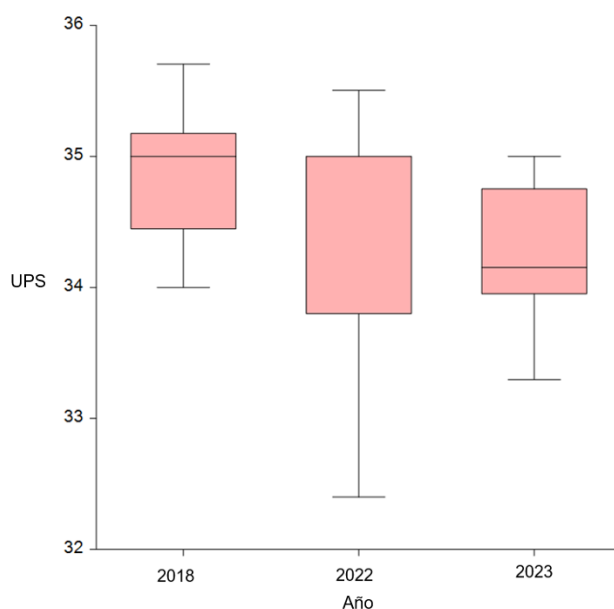


Figura 8. Distribución anual de la salinidad del agua en la zona noroeste de la isla de Cozumel

pH

El pH fue de 8.06 (7.94 – 8.39) (Figura 10). En 2022, el valor mínimo (7.8) se identificó en la estación E6A y el máximo (8.2) en las estaciones E1B, E6B y E7A. En 2023, el valor más bajo (7.94) se localizó en la estación E1A y el más alto (8.39) en la estación E5A (Figura 9).

Se hallaron diferencias significativas entre los años (Tabla 2) y entre los meses de muestreo (Tabla 3).

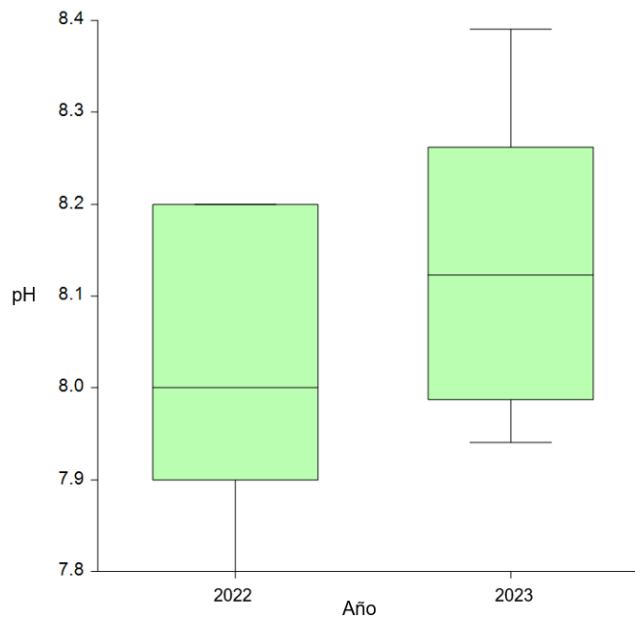


Figura 9. Distribución entre 2022 y 2023 del pH del agua de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Oxígeno Disuelto.

Para el oxígeno disuelto únicamente se obtuvieron datos durante el muestreo de 2018 (noviembre). Se registró una concentración promedio de 6.23 mg/L (5.66 – 6.80 mg/L), con el valor mínimo en la estación E5A y el máximo en la estación E7A (Figura 10).

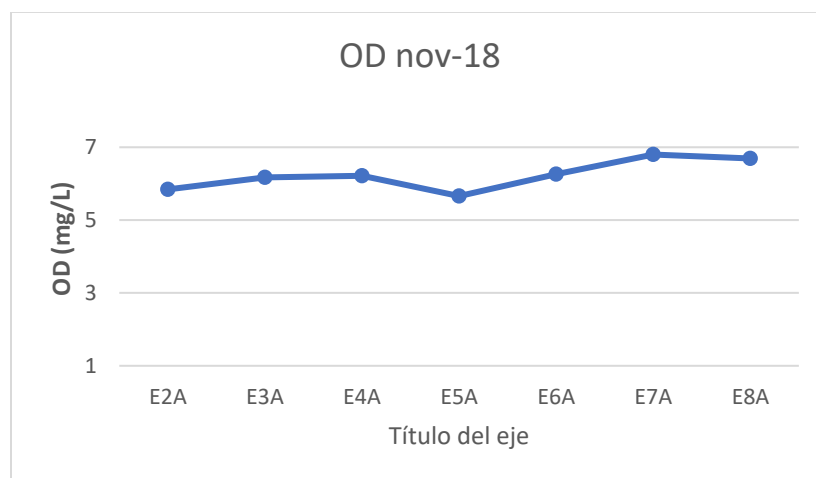


Figura 10. Distribución espacial de 2018 del oxígeno disuelto de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Tabla 2. Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre años de muestreo.

Variable	Promedio (min-max)			Estadístico	P ($P < 0.05$)
	2018	2022	2023		
Profundidad (m)	2.24	1.62	1.6	H= 2.4413	0.29504
	(0.1-6)	(0.1-5)	(0.1-5)		
Salinidad (UPS)	35.09	34.34	34.25	F= 2.5487	0.09395
	(34-38)	(32.4-35.5)	(33.3-34.4)		
Temperatura (°C)	28.22	28.98	30.45	H= 20.8306	0.00003
	(27-29.2)	(28-30)	(29.4-33.9)		
pH		8	8.13	t= -1.9612	0.03233
		(7.9-8.2)	(7.94-8.39)		

Entre años de muestreo, solo la temperatura y el pH presentaron diferencias a partir de los resultados del ANOVA y la prueba *t* de student (Tabla 2).

Tabla 3. Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre meses de muestreo.

Variable	Promedio (min-max)				Estadístico	P (P<0.05)
	Oct-18	Nov-18	22-jul	23-jul		
Profundidad (m)	1.8 (0.1-4)	2.62 (0.1-6)	1.62 (0.1-5)	1.6 (0.1-5)	H= 3.1373	0.37093
Salinidad (UPS)	35.28 (33-37)	34.9 (34-35.7)	34.34 (32.4-35.5)	34.25 (33.3-34.4)	H=5.1106	0.16387
Temperatura (°C)	27.71 (27-28)	28.73 (28.3-29.25)	28.98 (28-30)	30.45 (7.94-8.39)	H= 23.2174	0.00004
pH			8 (7.9-8.2)	8.13 (7.94-8.39)	t= -1.9612	0.03233

Entre meses de muestreo, los resultados se comportaron de forma similar a los resultados entre años, la temperatura y el pH obtuvieron diferencias significativas (Tabla 3).

Tabla 4. Promedio, estadístico y probabilidad de las variables ambientales de agua entre estaciones de muestreo.

Variable	Promedio (min-max)							Estadístico	P (P<0.05)
	E2A	E3A	E4A	E5A	E6A	E7A	E8A		
Profundidad (m)	1.30 (1.10-1.5)	1.32 (1-2)	1.5 (1.2-1.8)	1.62 (1-3)	2.3 (1-4)	2.55 (0.1-6)	0.1 (0.1-0.1)	H=8.4837	0.1315
Salinidad (UPS)	34.33 (34-35)	34.27 (34-34.6)	34.12 (33-35)	34.87 (33.8-35.7)	33.95 (32.5-35)	35.27 (34.1-37)	35.65 (34.7-38)	F=1.4096	0.42371
Temperatura (°C)	28.66 (28-30.1)	29.6 (28-32)	29.31 (33-35)	28.12 (25.5-30.4)	28.91 (32.5-35)	28.5 (27-29.5)	28.5 (27-29.4)	F=0.5783	0.1817

Es importante precisar que, al no contar con los datos de muestreo de las variables para todas las estaciones, se trabajó únicamente con las estaciones que cumplían los requisitos y con ello ejecutar el análisis. Por consiguiente, entre estaciones no hubo diferencias significativas de las variables de profundidad, salinidad y temperatura (Tabla 4).

Variables sedimentarias

Textura

En 2018, las arenas finas predominaron en la mayoría de las estaciones, con un promedio de 45.47% (14.32% – 82.06%). Las arenas medias tuvieron menor presencia, con un promedio de 32.50% (5.96% – 69.35%). En la estación E8A (octubre) se observó un predominio de arena gruesa con 51.33%. Las fracciones

con menor proporción en todas las estaciones fueron los gránulos (0.11%), la arena muy gruesa (1.01%), la arena muy fina (5.22%) y el limo grueso (0.24%).

En 2022, los mayores porcentajes de arenas finas se registraron en las estaciones E1A, E1B, E3A y E3B, con un promedio de 36.37% (6.88% – 56.44%). En las estaciones E6A y E6B, los valores más altos correspondieron a las arenas medias, con 21.1% (0.68% – 38.91%). En la estación E3B predominó la arena gruesa con 52.1%. En menor proporción se presentaron los gránulos (2.62%), la arena muy gruesa (2.24%), la arena muy fina (15.8%) y el limo grueso (1.27%).

En el muestreo de junio de 2023, las arenas finas abundaron en seis estaciones, con un promedio de 53.65% (0.60% – 84.36%), seguidas por las arenas gruesas, con un promedio de 15.57% (0.34% – 68.51%). En menor porcentaje entre las estaciones, se registraron los gránulos (1.80%), la arena gruesa (1.87%), la arena media (10.68%), la arena muy fina (16.38%) y el limo grueso (0.02%).

El análisis ANOVA mostró diferencias significativas entre los años de muestreo para el tipo de sedimento gránulo (Tabla 5). Entre los meses, las diferencias se observaron en los sedimentos gránulo y arena media (Tabla 6). Asimismo, entre las estaciones de muestreo, las fracciones que presentaron diferencias significativas fueron la arena media y la arena muy fina (Tabla 7).

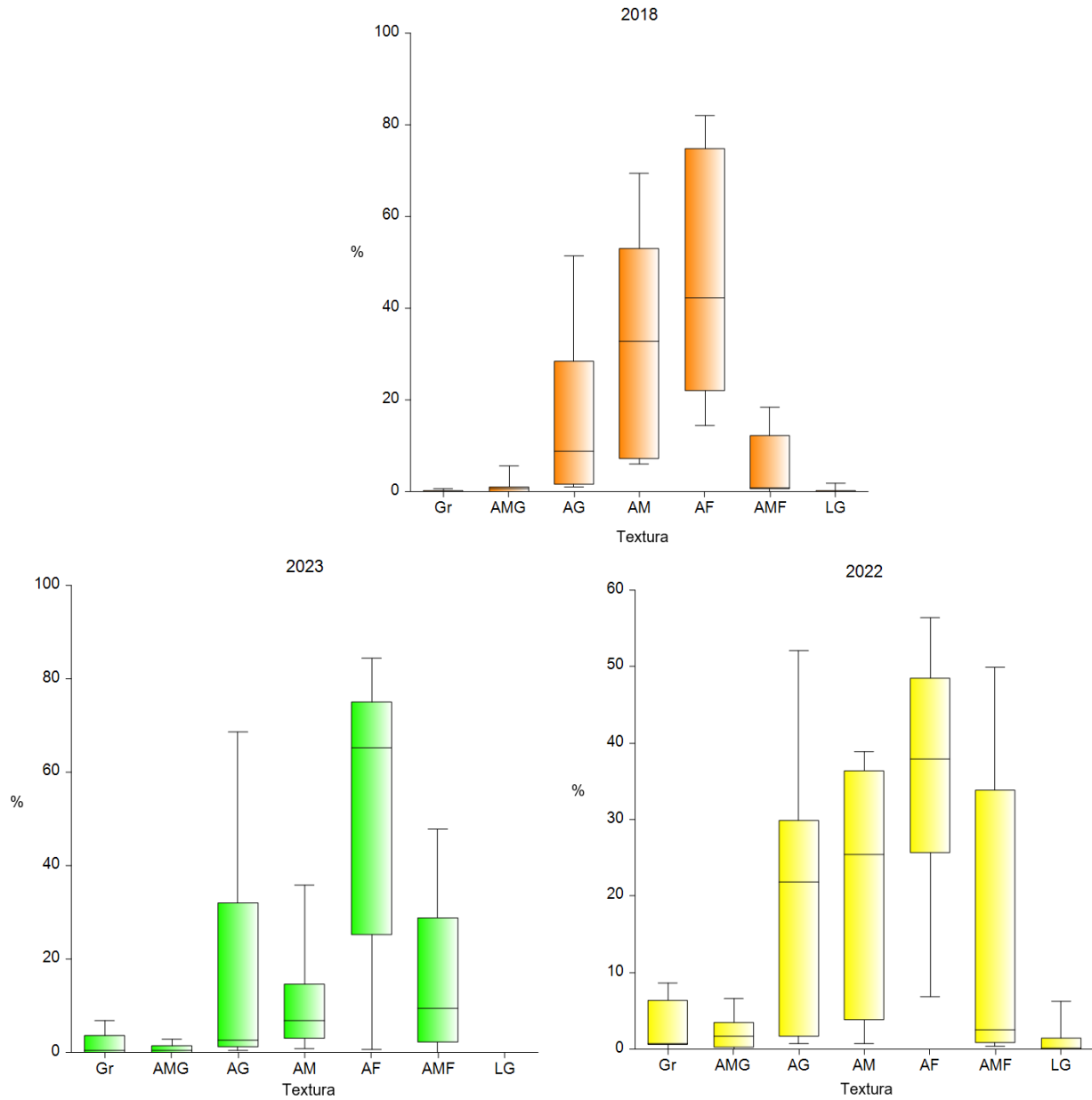


Figura 11. Distribución temporal del tipo de sedimento: granulo, arena muy gruesa, arena gruesa, arena media arena fina, arena muy fina y limo grueso en la zona noroeste de la isla de Cozumel en:: a) a) octubre-noviembre (2018), b) b) julio 2022 y c) julio c) 2023).

Carbono orgánico

Se obtuvo un promedio de contenido de carbono orgánico (CO) en la zona noroeste de la isla de Cozumel de 0.56% (0.29% – 1.34%) (Figura 12). En 2018, el promedio fue de 0.67% (0.49% – 0.8%), con el valor más alto en la estación E4A (octubre) y el más bajo en la estación E6A (noviembre). En 2022, la media de CO fue de 0.54% (0.29% – 1.34%), con el máximo en la estación E1A y el mínimo en la estación E5A. En el muestreo de 2023, el valor promedio de CO fue de 0.52% (0.39% – 0.79%), con el intervalo más alto en la estación E1A y los valores más bajos en las estaciones E6A y E7A.

El análisis ANOVA no mostró diferencias significativas entre los años (Tabla 5), ni entre los meses (Tabla 6) y estaciones de muestreo (Tabla 7).

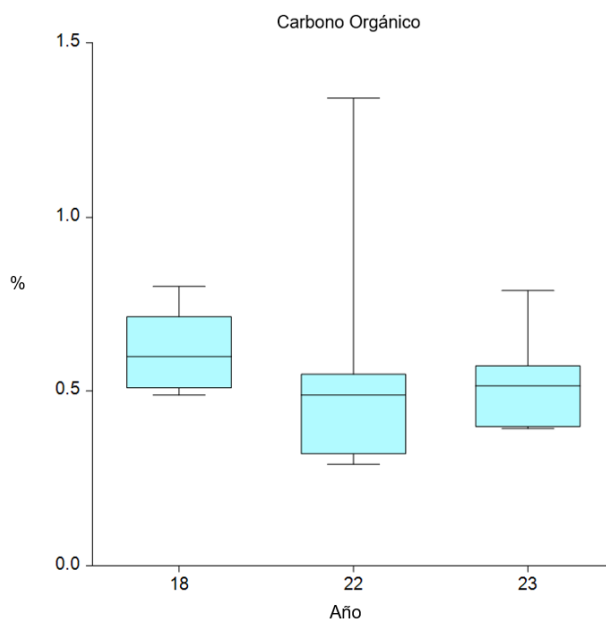


Figura 12. Distribución temporal de Carbono orgánico en la zona noroeste de la isla de Cozumel en:: a) a) octubre-noviembre 2018 b) b) julio 2022 c) julioy c) 2023).

Carbonatos

El porcentaje de carbonatos en la zona norte de Cozumel registró un valor promedio de 64.79% (63.5% – 67.4%) (Figura 13). En 2018, el promedio fue de 64.82%, con el valor más alto en la estación E7A (octubre) y el más bajo en la estación E5A (noviembre). En julio de 2022, se obtuvo un promedio de 65.02%, con el máximo en la estación E5A y el mínimo en la estación E1A. En 2023, la media fue de 64.55%, con el valor más elevado en la estación E1A y el menor en la estación E5A.

El análisis ANOVA no mostró diferencias significativas entre los años 2018, 2022 y 2023 (Tabla 4), entre los muestreos (Tabla 5) ni entre las estaciones de muestreo (Tabla 6).

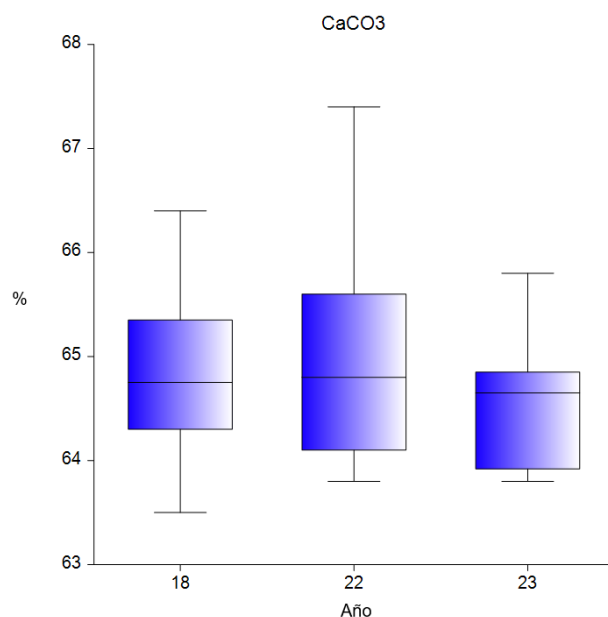


Figura 13. Distribución temporal de carbonatos en la zona noroeste de la isla de Cozumel en octubre-noviembre 2018, julio 2022 y julio 2023.

Es importante precisar que, al no contar con datos de las variables sedimentarias para todas las estaciones de muestreo, se filtraron los datos y se realizó el análisis únicamente con aquellas estaciones que cumplían los requisitos necesarios para llevarlo a cabo.

Tabla 5. Variables sedimentarias, promedio de cada año, estadístico aplicado y probabilidad en playa Santa Pilar y Playa Barracuda.

Variable	Promedio (min-max)			Estadístico	P (P<0.05)
	2018	2022	2023		
Carbono orgánico	0.61 (0.49-0.8)	0.54 (0.29-1.34)	0.51 (0.39-0.79)	H= 4.5759	0.10147
Carbonatos	64.82 (63.5-66.4)	65.02 (63.8-67.4)	64.55 (63.9-65.8)	F= 0.5009	0.12073
Granulo	0.11 (0-0.67)	2.62 (0-6.61)	1.79 (0-6.8)	H= 8.3966	0.01502
Arena muy gruesa	1.011 (0-5.58)	2.24 (0-6.61)	0.82 (0-2.9)	H=2.9213	0.23209
Arena gruesa	15.31 (0.92-51.33)	20.1 (0.68-52.1)	15.56 (0.34-68.51)	H=0.5121	0.7741
Arena media	32.5 (5.96-69.35)	21.1 (0.68-38.91)	10.67 (0.83-35.81)	F=3.0653	0.0679
Arena fina	45.47 (14.3-82.06)	36.37 (6.8-56.4)	53.64 (0.6-84.3)	F= 0.8841	0.42793
Arena muy fina	5.22 (0-18.34)	15.8 (0.8-49.96)	16.37 (0-47.83)	H=2.0503	0.35875
Limo grueso	0.24 (0-1.86)	1.27 (0-6.3)	0.02 (0-0.6)	H= 2.2579	0.32337

Solo se obtuvieron diferencias significativas entre los años de muestreo para la fracción de gránulo; el resto de las variables sedimentarias no presentó diferencias significativas (Tabla 5).

Tabla 6. Variables sedimentarias, promedio de cada mes, estadístico aplicado y probabilidad en la zona noroeste de Cozumel.

Variable	Promedio (min-max)				Estadístico	P (P<0.05)
	18-oct	18-nov	22-jul	23-jul		
C. orgánico	0.668 (0.51-0.8)	0.516 (0.49-0.55)	0.54 (0.2-1.3)	0.51 (0.39-0.79)	H= 6.8812	0.0757
Carbonatos	64.9 (64.3-66.4)	64.7 (63.5-65.4)	65.02 (63.8-67.4)	64.55 (63.9-65.8)	F=0.3461	0.7923
Granulo	0	0.33 (0-0.67)	2.62 (0-6.6)	1.79 (0-6.8)	H= 9.9487	0.0190
Arena muy gruesa	1.138 (0-5.5)	0.75 (0.2-1.4)	2.24 (0-6.6)	0.82 (0-2.9)	H=3.1426	0.3701
Arena gruesa	18.6 (0.9-51.3)	8.6 (2.2-14.8)	20.1 (0.6-52.1)	15.56 (0.34-68.51)	H=0.5399	0.9100
Arena media	19.543 (5.9-41.2)	58.42 (41.7-69.3)	21.1 (0.6-38.9)	10.67 (0.83-35.81)	F=8.6057	0.0007
Arena fina	52.9 (19.2-82.06)	30.49 (14.32-44.8)	36.37 (6.8-56.4)	53.64 (0.6-84.36)	F= 1.1588	0.3500
Arena muy fina	7.6 (0.7-18.3)	0.44 (0-0.67)	15.8 (0.8-49.9)	16.37 (0-47.83)	H=4.9428	0.1760
Limo grueso	0.052 (0-0.19)	0.62 (0-1.18)	1.27 (0-6.3)	0.02 (0-0.6)	H= 2.3360	0.5056

No obstante, el ANOVA realizado entre los meses de muestreo mostró diferencias significativas únicamente para las fracciones de gránulo y arena media (Tabla 6).

Tabla 7. Variables sedimentarias, promedio de cada mes, estadístico aplicado y probabilidad en la zona noroeste de Cozumel

Variable	Promedio (min-max)			Estadístico	P (P<0.05)
	3A	5A	6A		
Carbono orgánico	0.52 (0.41-0.67)	0.54 (0.29-0.8)	0.478 (0.32-0.71)	F=0.1305	0.06404
Carbonatos	64.4 (64.1-64.6)	64.92 (63.8-67.4)	64.66 (64-65.2)	H=0.3364	0.8452
Granulo	0.13 (0-0.41)	2.25 (0.06-8.6)	2.58 (0-6.91)	F=0.5506	0.11243
Arena muy gruesa	0.18 (0-0.55)	1.88 (0-6.6)	1.78 (0.27-3.44)	H=1.8256	0.4014
Arena gruesa	1.08 (0.62-1.66)	18.92 (1.59-52.1)	21.92 (2.2-40.3)	F=1.4590	0.2274
Arena media	3.52 (0.68-6.57)	29.38 (7.91-69.35)	42.27 (32.75-64.18)	H=6.7273	0.03461
Arena fina	63.07 (48.53-74.01)	43.2 (6.8-82.06)	30.53 (16.55-42.22)	H=2.3258	0.3125
Arena muy fina	31.88 (18.34-49.96)	4.31 (0.33-8.42)	0.61 (0-1.18)	H=6.4091	0.04058
Limo grueso	0.086 (0-0.13)	0.015 (0-0.06)	0	H=4.1944	0.1228

El ANOVA realizado para comparar las variables sedimentarias entre estaciones indicó que únicamente las fracciones de arena media y arena muy fina presentaron diferencias significativas (Tabla 7).

Análisis de correlación

Se empleó una matriz de correlación de Spearman debido a que los datos no se comportaron de manera normal ni homocedásticamente en alguna de las variables correlacionadas. Dicho análisis se elaboró con el propósito de determinar las relaciones entre las variables sedimentarias y las de agua a lo largo de los años.

Se observó que el CO presentó una correlación positiva con la arena fina y la arena muy fina, mientras que con la arena gruesa se evidenció una correlación negativa. La fracción gránulo mostró una correlación positiva con la arena muy gruesa. Por su parte, la arena gruesa exhibió una correlación negativa con la arena fina y la arena muy fina (Tabla 8).

Tabla 8. Correlación de Spearman entre 2018, 2022 y 2023.

Variables correlacionadas	P ($P < 0.05$)	Valor de la correlación
Carbono orgánico y arena fina	0.000411	0.6750
Carbono orgánico y arena muy fina	0.003106	0.5890
Gránulo y arena muy gruesa	0.000084	0.7275
Arena muy gruesa y arena gruesa	0.000109	0.7195
Arena gruesa y arena media	0.000024	0.7619
Arena gruesa y arena fina	0.000008	-0.7887
Arena gruesa y arena muy fina	0.000002	-0.8168

El análisis de correlación por muestreos mostró una relación positiva entre el carbono orgánico y la fracción de arena muy fina, mientras que con la arena gruesa la relación fue negativa. La fracción gránulo se asoció positivamente con la arena

muy gruesa y negativamente con la arena muy fina. Asimismo, la arena gruesa presentó una relación positiva entre estaciones y una relación inversamente proporcional con la arena muy fina. Un patrón similar también se observó entre la arena gruesa y la arena muy fina (Tabla 9).

Tabla 9. Correlación de Spearman entre muestreos.

Variables correlacionadas	P (P<0.05)	Valor de la correlación
Carbono orgánico y arena muy fina	0.000463	0.6706
Carbono orgánico y arena fina	0.001746	0.6161
Gránulo y arena muy gruesa	0.000906	0.6447
Gránulo y arena muy fina	0.001628	-0.6193
Arena muy gruesa y arena gruesa	0.000083	0.7276
Arena muy gruesa y arena muy fina	0.000757	-0.6515
Arena gruesa y arena muy fina	0.000000	-0.8758

Resultados de riqueza de especies de macroalgas

Los ecosistemas marinos albergan una notable diversidad de organismos, entre los cuales destacan las macroalgas, los pastos marinos y los invertebrados marinos. Estos grupos desempeñan funciones esenciales en la salud y estabilidad de los sistemas acuáticos, ya que proporcionan hábitats, refugio y alimento para una amplia variedad de especies. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la riqueza de especies de macroalgas, pastos marinos e invertebrados marinos registrados en la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Se identificaron 57 especies de macroalgas, distribuidas en tres divisiones, cuya presencia espacial y temporal se muestra en la Tabla 10. De ellas, 34 pertenecen a Chlorophyta (60% del total), 19 a Rhodophyta (33%) y cuatro a Ochrophyta (7%) (Figura 14). La mayor riqueza específica se registró en la estación E1A, con 28 especies, seguida de E6A con 26 taxa y de E2A y E5A con 22 especies cada una. Por el contrario, las estaciones con menor riqueza fueron E3B (una especie), E6B (cuatro especies) y E1B (siete especies).

El Orden con mayor riqueza para la División Chlorophyta fue Bryopsidales representado con las especies *Caulerpa cupressoides* (Vahl) C.Agardh, *C. cupressoides* var. *flabellata* Børgesen, *C. lanuginosa* J.Agardh, *C. mexicana* Sonder ex Kützinger, *C. microphysa* (Weber Bosse) Feldmann, *C. prolifera* (Forsskål) J.V.Lamouroux, *C. sertularioides* (S.G.Gmelin) M.Howe, *Avrainvillea nigricans* Decaisne, *A. silvana* D.S.Littler & Littler, *Boodleopsis verticillata* E.Y.Dawson, *Halimeda gracilis* Harvey ex J.Agardh, *H. monile* (J.Ellis & Solander) J.V.Lamouroux, *H. opuntia* (Linnaeus) J.V.Lamouroux, *H. scabra* M.Howe, *H. simulans* M.Howe, *Penicillus dumetosus* (J.V.Lamouroux) Blainville, *P. lamourouxii* Decaisne, *Rhipocephalus oblongus* (Decaisne) Kützinger, *R. phoenix* (J.Ellis & Solander) Kützinger, *R. phoenix* f. *brevifolius* A.Gepp & E.S.Gepp, *R. phoenix* f. *longifolius* A.Gepp & E.Gepp, *Udotea cyathiformis* f. *infundibulum* (J.Agardh) D.S.Littler & Littler, *U. dixonii* D.S.Littler & Littler, *U. dotyi* D.S.Littler & Littler, *U. fibrosa* D.S.Littler & Littler, *U. flabellum* (J.Ellis & Solander) M.Howe y *U. luna* D.S.Littler & Littler. Seguido del orden Cladophorales representado por las especies *Cladophora catenata* Kützinger, *Chaetomorpha gracilis* Kützinger, *Dictyosphaeria cavernosa*

(Forsskål) Børgesen y *Ventricaria ventricosa* (J.Agardh) J.L.Olsen & J.A.West. El siguiente Orden con mayor presencia fue Dasycladales, del cual se registraron las especies *Neomeris annulata* Dickie y *Acetabularia schenckii* Möbius, por último, el Orden Ulvales con una única especie, *Ulva intestinalis* (Tabla 10).

Para la División Rhodophyta el Orden con mayor riqueza fue Ceramiales, con las especies *Centroceras clavulatum* (C.Agardh) Montagne, *Dasya cf. pedicellata* (C.Agardh) C.Agardh, *D. crouaniana* J.Agardh, *D. ocellata* (Grateloup) Harvey, *Digenea arenahauriens* C.W.Schneider, Hamzeh & G.W.Saunders, *D. mexicana* G.H.Boo & D.Robledo, *Alsidium seaforthii* (Turner) J.Agardh, *Laurencia intricata* J.V.Lamouroux, *L. microcladia* Kützinger, *Polysiphonia binneyi* Harvey y *Yuzurua poiteau* (J.V.Lamouroux) Martin-Lescanne. Seguido del Orden Gigartinales, donde se encuentran las especies *Hypnea spinella* (C.Agardh) Kützinger, *Eucheumatopsis isiformis* (C.Agardh) Núñez-Resendiz, Dreckmann & Senties y *Meristotheca spinella* Núñez-Resendiz, Dreckmann & Senties. Cinco órdenes fueron representados por una especie; en el Orden Corallinales figuró la especie *Hydrolithon farinosum* (J.V.Lamouroux) Penrose & Y.M.Chamberlain; el Orden Gelidiales con la especie *Gelidium americanum* (W.R.Taylor); Santelices el Orden Nemaliales con la especie *Dichotomaria marginata* (J.Ellis & Solander) Lamarck; Gracilariales, con la especie *Gracilaria cornea* J.Agardh ; y el Orden Rhoymeniales, representado por *Coelothrix irregularis* (Harvey) Børgesen (Tabla 10).

El Orden con mayor riqueza de la División Ochrophyta fue Dictyotales, las especies de dicho Orden fueron: *Dictyota pulchella* Hörnig & Schnetter, *D. pinnatifida* Kützinger

y *Padina pavonica* (Linnaeus) Thivy, Seguido del Orden Fucales con la especie *Sargassum cf. cymosum* C.Agardh (Tabla 10).

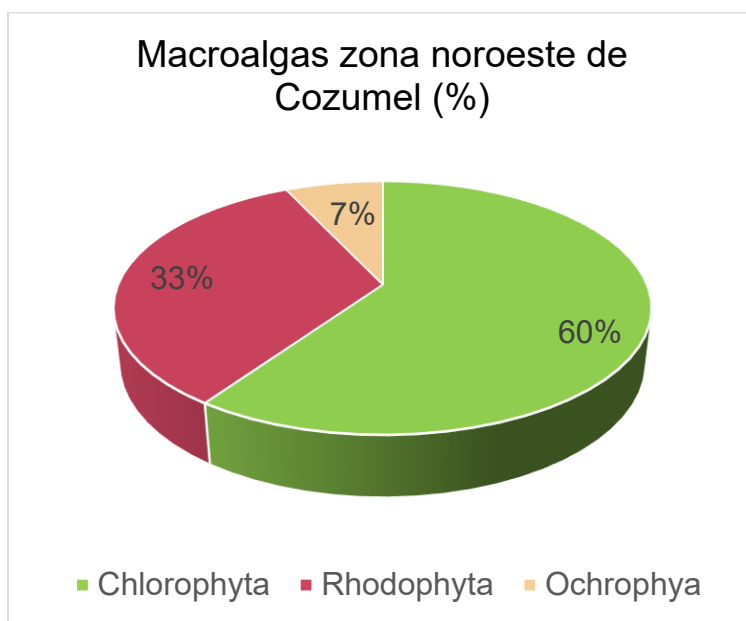


Figura 14. Porcentaje de riqueza de especies de macroalgas por División en la zona noroeste de Cozumel durante 2018, 2022 y 2023.

Se identificaron nueve especies que presentan nuevos registros para la isla de Cozumel, las cuales son: *Avrainvillea silvana*, *Boodleopsis verticillata*, *Udotea dotyi*, *Udotea fibrosa*, *Meristotheca spinella*, *Digenea arenahuriens*, *Digenia mexicana*, *Alsidium seaforthii* y *Padina pavonica*.

Se registraron cuatro especies de macroalgas consideradas bioindicadoras de contaminación por nutrientes. *Ulva intestinalis* se registró en las estaciones E1A, E2A, E5A, E6A y E6B durante los años 2018 y 2023. *Chaetomorpha gracilis* fue observada en E1A y E6B en 2022 y 2023. *Hypnea spinella* se detectó en E3A en

2022, mientras que *Laurencia intricata* se encontró en las estaciones E5A, E6A y E6B durante 2022 y 2023 (Tabla 10).

En 2018, la mayor riqueza de especies se reconoció en la estación E2A con 14 especies, seguida de E4A y E3A con seis y cinco especies, respectivamente. Para 2022, la estación con mayor riqueza fue E1A con 19 especies, seguida de E5A con 16 y E3A con 13 especies. En 2023, la estación E6A presentó el mayor número de especies con 19, seguida de E1A con 16 y E7A con 12 especies.

Tabla 10. Listado de especies de macroalgas marinas de la zona noroeste de la isla de Cozumel. Presencia en los años de colecta.

TAXA	2018	2022	2023
Chlorophyta			
Ulvales			
Ulvaceae			
<i>Ulva intestinalis</i>	X		X
Cladophorales			
Cladophoraceae			
<i>Cladophora catenata</i>	X	X	X
<i>Chaetomorpha gracilis</i>		X	X
Siphonocladaceae			
<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>			X
Valoniaceae			
<i>Ventricaria ventricosa</i>		X	
Bryopsidales			
Caulerpaceae			
<i>Caulerpa cupressoides</i>		X	X
<i>Caulerpa cupressoides var. Flabellata</i>			X
<i>Caulerpa lanuginosa</i>		X	X
<i>Caulerpa mexicana</i>		X	
<i>Caulerpa microphysa</i>		X	
<i>Caulerpa prolifera</i>		X	

<i>Caulerpa sertularioides</i>		X	
Dichotomosiphonaceae			
<i>Avrainvillea nigricans</i>			X
<i>Avrainvillea silvana</i>		X	
Halimedaceae			
<i>Boodleopsis verticillata</i>	X	X	X
<i>Halimeda gracilis</i>			
<i>Halimeda monile</i>		X	X
<i>Halimeda opuntia</i>			X
<i>Halimeda scabra</i>	X	X	X
<i>Halimeda simulans</i>		X	X
<i>Penicillus dumetosus</i>	X	X	X
<i>Penicillus lamouroxii</i>		X	X
<i>Rhipocephalus oblongus</i>		X	X
<i>Rhipocephalus phoenix</i>	X	X	X
<i>Rhipocephalus phoenix f. brevifolius</i>			X
<i>Rhipocephalus phoenix f. longifolius</i>			X
<i>Udotea cyathiformis f. infundibulum</i>	X		
<i>Udotea dixonii</i>		X	X
<i>Udotea dotyi</i>		X	X
<i>Udotea fibrosa</i>		X	X
<i>Udotea flabellum</i>		X	X
<i>Udotea luna</i>		X	X
Dasycladales			

Dasycladaceae			
<i>Neomeris annulata</i>		X	X
Polyphsaceae			
<i>Acetabularia schenckii</i>		X	X
Rhodophyta			
Corallinales			
Hydroliyhaceae			
<i>Hydrolithon farinosum</i>			X
Gelidiales			
Gelidiaceae			
<i>Gelidium americanum</i>	X		X
Nemaliales			
Galaxauraceae			
<i>Dichotomaria marginata</i>		X	X
Gigartinales			
Cystocloniaceae			
<i>Hypnea spinella</i>		X	
Solieriaceae			
<i>Eucheumatopsis isiformis</i>			X
<i>Meristotheca spinella</i>			X
Gracilariales			
Gracilariaceae			
<i>Gracilaria cornea</i>	X		
Rhodymeniales			

Rhodymeniaceae*Coelothrix irregularis*

X

Ceramiales**Ceramiaceae***Centroceras clavulatum*

X

X

Delesseriaceae*Dasya cf. pedicellata*

X

Dasya cf. crouaniana

X

X

Dasya ocellata

X

X

Digenea arenahauriens

X

X

X

Digenea mexicana

X

X

X

Alsidium seaforthii

X

X

X

Ceramiales**Rhodomelaceae***Laurencia intricata*

X

X

Laurencia microcladia

X

X

X

Polysiphonia binneyi

X

Yuzurua poiteau

X

X

Ochrophyta**Dictyotales****Dictyotaceae***Dictyota pulchella*

X

Dictyota pinnatifida

X

X

Padina pavonica

X

X

Fucales			
Sargassaceae			
<i>Sargassum cf. cymosum</i>	X	X	X
Tracheophyta			
Alismatales			
Hydrocharitaceae			
<i>Thalassia testudinum</i>	X	X	
Cymodoceaceae			
<i>Halodule wrightii</i>	X	X	X
<i>Syringodium filiforme</i>	X	X	X

A continuación, las descripciones morfológicas de las especies identificadas en este trabajo, así como imágenes de su morfología.

Los números entre paréntesis corresponden a las medidas obtenidas directamente de las macroalgas en este estudio. Estos valores permiten comparar las dimensiones observadas con aquellas descritas previamente en la literatura o en fuentes taxonómicas.

Descripciones morfológicas de macroalgas

Chlorophyta

Clase: Ulvophyceae

Orden: Ulvales

Familia: Ulvaceae

Ulva intestinalis Linnaeus 1753

Figura 15. A-B.

Habito erecto, alargado, tubular (100-150 μm de diámetro), puede presentar ramificaciones en la porción basal; color verde a verde amarillento; células rectangulares (250-260 μm).

Orden: Cladophorales

Familia: Cladophoraceae

***Chaetomorpha gracilis* Kützinger**

Figura 15. E-F.

Talo fino, fibroso, filamentoso, de hasta 15 cm de largo (6.5 cm) de forma indeterminada; color amarillo verdoso brillante; adheridos libremente por células basales, se liberan fácilmente; filamentos rectos, rizados o retorcidos, no ramificados; células cilíndricas de 32-100 μm de diámetro (100-140 μm); célula basal de 125-360 μm de largo (100-250 μm).

***Cladophora catenata* Kützinger**

Figura 15. C-D.

Talo filamentoso en mechones pequeños densos en forma de pompones, cojines u ocasionalmente como bolas esféricas sueltas de 2 a 9 cm de altura (3.3 cm); de color verde hierba brillante a verde oscuro; ramificación irregular, dicotómica a alternada abajo, algo unilateral arriba; ramas en las articulaciones de uno a raramente dos; células cilíndricas de hasta 420 μm de diámetro (360-400 μm).

Familia: Siphonocladaceae

***Dictyosphaeria cavernosa* (Forsskål) Børgesen**

Figura 15. G-H.

Talo en forma de saco, hueco, esférico cuando es joven, irregularmente lobulado o roto cuando es viejo, de hasta 12 centímetros de diámetro (3.9 cm); color verde claro; células primarias de 0.1 a 3 mm de diámetro (400- 600 μm) en una capa, angulares o poliédricas en vista superficial, con apariencia de panal, adheridas entre

sí mediante células microscópicas hapteroides (35 µm de diámetro); células hapteroides que forman una fila continua en el tope de las células primarias.

Ventricaria ventricosa (J.Agardh) J.L.Olsen y J.A.West

Figura 16. A-B

Talo solitario o varias células macroscópicas, grandes, no ramificadas, poco conectadas, de 2-5 o hasta 10 cm de diámetro, de color verde oscuro brillante con reflejos brillantes, células esféricas a oblongas, firmes; paredes celulares delgadas y resistentes.

Orden: Bryopsidales

Familia: Caulerpaceae

Caulerpa cupressoides (Vahl) C.Agardh

Figura 16. C-D.

Estolones rastreros de 1 a 1,5 mm de diámetro; fronda erecta con 3 a cuatro columnas longitudinales de hasta 25 cm (5 cm) de altura; color verde hierba; ramificación dicotómica; ramillas nudosas, rígidas, cónicas, de hasta 0,4 mm (1 mm) de diámetro, 1-2 mm (1.5 cm) de largo.

Caulerpa cupressoides var. flabellata Børgesen

Figura 16. E-F.

Fronda rígida, erecta, con espinas marginales o ramillas cortas, de hasta 10 cm de altura (3 cm); color verde hierba; ramificación y regular a algo dicotómica; ramillas

duras, rígidas, opuestas, a menudo parecidas a espinas; de 0.8 -1 mm de diámetro y de 0.5 -1.5 mm de largo; eje central comprimido o aplanado; estolones rastreros de 2 a 2.5 mm de diámetro (1.3 mm).

Caulerpa lanuginosa J.Agardh

Figura 16. G-H.

Estolones rastreros de 0,4 a 1 mm de diámetro; fronda cubierta por ramillas muy juntas de 3 a 13 cm (4cm) de altura; color verde oscuro; ramificación y regular, escasa o no ramificada; ramillas cilíndricas de 60 a 200 μ m (3 mm) de diámetro, de 3 a 5 mm (3.5 cm) de largo.

Caulerpa microphysa (Weber Bosse) Feldmann

Figura 17. C-D.

Frondas con racimos de ramitas grandes en forma de cuentas de hasta 6 cm de altura (4cm); Color verde hierba a menudo con pigmentación moteada o manchada; ramillas esféricas a ligeramente en forma de hongo de 3 a 7 mm de diámetro (2.5 mm); tallos cuando están presentes de uno a 2 mm de diámetro y 2 mm de largo (0.2-0.5 mm); estolones rastreros de 3 a 4 mm de diámetro.

Caulerpa mexicana Sonder ex Kützinger

Figura 17. A-B.

Fronda erecta, con forma de plumas aplanadas, variables. Las formas enanas de hasta 2 cm de alto y de 4-10 mm de ancho en áreas expuestas a las olas. Las formas alargadas de 15-25 cm de alto (4.5 cm) y de 5-25 cm de anchos en hábitats

tranquilos y protegidos, color verde hierba, sin ramificar u ocasionalmente ramificados, ramillas opuestas, aplanadas, curvadas hacia arriba de 2-4 mm de ancho (3 mm), 2-10 mm de largo (6 mm) con un ápice puntiagudo. Eje central, plano, ancho, de 1-3 mm de ancho (1mm).

Caulerpa sertularioides (S.G.Gmelin) M.Howe

Figura 17. G-H.

Fronda erecta, plumosa, en ocasiones ramificada, hasta 20 cm de altura (5.5 cm) y 1-2 cm de ancho, de color verde claro. Ramillas opuestas, cilíndricas aciculares, de 180-330 μ m de diámetro (250 μ m), 3-11 mm de largo, curvadas hacia arriba o rectas, con ápices puntiagudos el eje central cilíndrico de 1-1,5 mm de diámetro (1 mm).

Caulerpa prolifera (Forsskål) J.V.Lamouroux

Figura 17. E-F.

Fronda delgada, delicada a gruesa, entera ovalada a alargada, plana, de 6 a 15 cm de largo (4.5 cm), llegan a proliferar láminas secundarias desde la vena central de la lámina principal a menudo ramificado; estolones rastreros de 1 a 1.5 mm de diámetro (1.5 mm).

Familia: Dichotomosiphonaceae

Avrainvillea nigricans Decaisne

Figura 18. A-B.

Talos solitario, rara vez agrupado, de hasta 30 cm de alto; color verde oscuro a marrón verdoso, margen exterior a menudo más oscuro; hojas en forma de cuña ovalada de hasta 23 cm de ancho (8 cm) y 15 cm de largo (8 cm); Márgenes suavemente redondeados; zonación débil; sífonos interiores y de superficie uniformemente de 30-40 μm de diámetro (40 μm), profundamente moniliformes a cilíndricos; estípite cilíndrico, de uno a 4 cm de diámetro (6 mm) a 9 cm de largo (3.5 cm); sífonos centrales de 30-60 μm de diámetro, ligeramente moniliformes.

Avrainvillea silvana D.S.Littler y Littler

Figura 18 C-D.

Talo solitario, rara vez agrupado, de hasta 17 cm de alto (7 cm), de color verde oliva con láminas ovaladas de hasta 16 cm de ancho y 11 cm de largo, lisas, márgenes irregulares o erosionados; zonificación débil o ausente, sífonos interiores de 45 - 80 μm de diámetro (40-50 μm), moniliformes; sífonos superficiales que se estrecharon rápidamente a 20 μm de diámetro moniliformes. Estípite de hasta 7 mm de diámetro (3 mm) y 7 cm de largo (5.5 mm), cilíndrico, rara vez ramificado; sífonos de 50-70 μm de diámetro (80 μm), moniliformes a ocasionalmente cilíndricos.

Familia: Halimedaceae

Boodleopsis verticillata E.Y.Dawson

Figura 18. E-F.

Talos en forma de esfera sueltas o mechones de sifones entretejidos de tamaño indefinido; de color verde brillante; sifones con pocas o ninguna pared transversal de 50-100 μm de diámetro (250 μm), mayoritariamente cilíndricas a veces onduladas, raramente moniliformes, constreñidas en la base de las ramillas, ramifica dicotómica, tricotómica a verticilada; sifones grandes a menudo sin pigmentar, punta creciente ligeramente bulbosa.

Halimeda scabra M.Howe

Figura 19 E-F.

Talo erecto, de 5 a 25 cm (3.4 cm) de altura; color verde grisáceo opaco; ramificación en un plano; segmentos ligeramente calcificados, en forma de disco o cuña; de 2 cm (1 cm) de ancho, 1,5 cm de largo; utrículo 50 μm (40 μm) de diámetro con espina superficial; estípites distinguibles por segmentos fusionados.

Halimeda simulans M.Howe

Figura 19. G-H.

Talo erecto de hasta 15 cm de altura (8 cm); color verde claro; ramificándose algo dicotómico, en un solo plano; segmentos muy calcificados, duros, en forma de disco, con forma de riñón a ovalado, trilobulados; de 4 a 15 mm de ancho (6 mm) y de 2 a 11 mm de largo (8 mm); utrículos en 3 a 5 capas; utrículos superficiales de 25-45 hasta 60 μm de diámetro (50 μm) y 25-90 μm de largo (50 μm); utrículos supsuperficiales de 30- 72 μm de diámetro (60 μm) y 30-115 μm de largo μm (110 μm).

Halimeda opuntia (Linnaeus) J.V. Lamouroux

Figura 19. C-D.

Talo que forma grupos o montículos densos de hasta 20 cm (3.9 cm) de largo; color amarillo verdoso a verde oscuro; ramificación irregular aleatoria; segmentos muy calcificados, planos a retorcidos, acanalado o lobulados, de 11 mm (1.1cm) de ancho, 7 mm (45 mm) de largo; utrículos subsuperficiales de 11-50 μm ; utrículos de 20-50 μm (40 μm) de diámetro.

Halimeda gracilis Harvey ex J.Agardh

Figura 19. G-H.

Talo erecto de hasta 20 cm (4 cm) de alto o 40 cm de largo si es rastrero; color verde claro; ramificación inicial en un plano; segmentos muy calcificados duros en forma de disco u ovalada; de 15 mm (11 mm) de ancho y 9 mm (6 mm) de largo; planos rara vez acanalados o lobulados; utrículos superficiales de 30 a 60 μm (40 μm) de diámetro y de 100 a 300 μm (100 μm) de largo.

Halimeda monile (J. Ellis y Solander) J.V.Lamouroux

Figura 19. A-B.

Talo erecto de hasta 20 cm de alto (5 cm); color verde oscuro; segmentos calcificados distalmente cilíndricos, en otras partes en forma de disco o trilobulados de 1 a 5 mm de ancho (3 mm); utrículos en 3-5 capas; utrículos superficiales de 30-60 μm de diámetro (35 μm) y 48-115 μm de largo (100 μm); utrículos subsuperficiales de 23-90 μm (45 μm) de diámetro, 23-130 μm de largo (60 μm).

Penicillus dumetosus (J.V.Lamouroux) Blainville

Figura 20. A-B.

Masa rizoidal prominente; talo de 10-15 cm de largo; color verde brillante a verde oscuro; estípite de 15 mm de diámetro y hasta 8 cm de largo; capitulo calcificado; utrículos de 500 a 1000 μm de diámetro; sifones del capitulum de 400-800 μm de diámetro.

Penicillus lamouroxii Decaisne

Figura 20. C-D.

Talo rígido, muy calcificado de hasta 10 cm (7.5 cm) de altura; color verde claro descolorido; estípite de 5-8 mm (6 mm) de diámetro y 3-4 cm (3.5 cm) de largo, diferenciado de la fronda; utrículos de 300-500 μm (340 μm) de diámetro, moniliformes.

Rhipocephalus oblongus (Decaisne) Kützinger

Figura 20. E-F.

Talo ligeramente calcificado de hasta 20 cm (4.5 cm) de altura; color verde oscuro; estípite de 3-6 mm (3.5 mm) de diámetro y de 3-7 cm (1.2 cm) de largo; se diferencia del capítulo, calcificado; utrículos de 50-60 μm (35-40 μm) de diámetro; ápices redondeados que se estrechan; capítulo de 1-3 cm (9 mm) de diámetro y de 2-5 cm (2.9 cm) de largo en forma de cono; sifones de 100-200 μm (160 μm) de diámetro no fusionados.

Rhipocephalus phoenix J. Ellis y Solander) Kützinger

Figura 21. G-H.

Talo ligeramente calcificado de hasta 10 cm (3 cm) de altura; color verde oscuro; estípite de 3-5mm (2 mm) de diámetro y 2-5 mm de largo, se diferencia del capítulo; utrículos de 50 μ m de diámetro; capítulo de 1-9 cm (1.2 cm) de largo con forma ovoide; sifones de 130-250 μ m (130 μ m) de diámetro, delgados, con ramificación dicotómica a distancias iguales desde la base.

Rhipocephalus phoenix f. brevifolius

Figura 21. A-B.

Talo ligeramente calcificado de hasta 20 cm (8 cm) de altura; color amarillo verdoso a verde oscuro; estípite cilíndrico, generalmente corto de alrededor de 3mm de diámetro; utrículos de 50-100 μ m (40 μ m) de diámetro; capitulum de 1-2 cm (3 cm) de largo y concéntricas en forma de tejas (3 mm de diámetro); sifones de 200-250 μ m (240 μ m) de diámetro fusionados lateralmente; con dicotomías a distancias iguales desde la base.

***Rhipocephalus phoenix f. longifolius* A.Gepp y E.Gepp**

Figura 21. C-D.

Talo ligeramente calcificado de 4 a 7 cm de alto (5.7 cm); color verde oscuro a verde claro; habito cilíndrico a irregular con láminas largas a menudo flojas o flácidas; láminas de 3 a 5 cm de largo (2 cm), planas, concéntricas, dispuestas de manera laxa, no compactas; sifones cilíndricos, paralelos, fusionados lateralmente, 200-250

µm de diámetro (240 µm). Proximalmente 50-100 µm (130 µm). Dicotomías a distancias iguales desde la base, una o dos dicotomías inferiores no constreñidas.

Udotea cyathiformis f. infundibulum (J.Agardh) D.S.Littler y Littler

Figura 21. E-F.

Talo calcificado, de hasta 8 cm de alto (2.8), de color verde, con una lámina delicada, papirácea, a menudo más ancha que larga, sifones de la fronda de 30-70 µm de diámetro (50 µm), pie de 1-2 o hasta 4 mm de diámetro (4 mm) y 0,3- 2 cm de largo (utrículos del estípote de 60 µm de diámetro).

Udotea dixonii D.S.Littler y Littler

Figura 21. G-H.

Talo ligeramente calcificado de hasta 20 cm (10 cm) de altura en forma de abanico, ligeramente calcificado; color amarillo, verdoso a verde oscuro; estípote de 2-3 mm (1.5mm) de diámetro y 2-6 mm (1cm) de largo la transición entre el estípote y la lámina no es evidente; una masa rizoidal puede generar hasta cinco talos erectos; lámina de 6-12 cm (8.9cm) de largo y 4-10 cm (3 cm) de ancho; planas, lobuladas, corticadas; con zonación distinta; sifones de 20 a 35µm de diámetro.

Udotea dotyi D.S.Littler y Littler

Figura 22. A-B.

Talo en forma de abanico muy calcificado de hasta 23 cm de alto (7.9 cm); de color amarillo verdoso a gris verdoso oscuro, gris verdoso claro cuando se seca; estípote de hasta 3-6 mm de diámetro y 2 cm de largo; lámina de hasta 14 cm (5 cm) de

ancho y 10 cm de largo; no lobuladas o escasamente lobulada, planas, corticadas; sífonos de 60-80 μm de diámetro; masa rizoidal fibrosa.

Udotea fibrosa D.S.Littler y Littler

Figura 22. C-D.

Talo en forma de abanico muy calcificado de hasta 9 cm (4.1cm) de altura; color verde oscuro opaco, verde claro cuando se seca; estípites robustos de hasta 5 mm (2 mm) de ancho y 1 cm (1.7 cm) de largo; lámina de hasta 8 cm (2.5 cm) de largo y 5 cm (2 cm) de ancho; corteza ausente; falta de zonificación; sífonos de 50-150 μm (30-40 μm) de diámetro sin apéndices laterales; ligeramente moniliformes.

Udotea flabellum (J.Ellis y Solander) M.Howe

Figura 22. E-F.

Talo en forma de abanico moderadamente calcificado de hasta 30 cm (10 cm) de altura; color verde pálido a verde oscuro; estípites cilíndricos en la parte inferior y aplanados en la superior; de 5-7 mm de diámetro y 2-4 mm de largo, no ramificados; utrículos de 20-80 μm de diámetro; lámina con sífonos de 30-50 μm diámetro; dicotomías ausentes o ligeramente desiguales; los ápices parecen encogidos o planos cuando se secan.

Udotea luna D.S.Littler y Littler

Figura 22. G-H.

Talo en forma de abanico o media luna, ligeramente calcificado, de hasta 7 cm (4.5 cm); color verde oscuro cuando es joven y verde claro cuando es viejo; lámina más ancha que larga; corteza ausente; sifones de 50-80 μm (30-50 μm); estípites 1-3 mm de diámetro (1.5 mm); sifones de 60-90 μm de diámetro (80 μm).

Orden: Dasycladales

Familia: Dasycladaceae

Neomeris annulata Dickie

Figura 23. A-B.

Talo solitario o en grupos, cilíndricos, erectos o arqueados hacia abajo, de 1-3 mm (3mm) de diámetro y 1-3cm (3.5cm) de largo; ápice color verde con penacho filamentosos apicales caducifolios; eje central de 400-700 μm (700 μm); ramitas en verticilos desde el eje central; células superficiales de 80-135 μm de diámetro.

Familia: Polyphsaceae

Acetabularia schenckii Möbius

Figura 23. C-D.

Talos solitarios o en racimos en forma de sombrilla; de 3-8 cm (5 cm) de altura ligeramente calcificado; de color blanco verdoso; estípites de 420-660 μm de diámetro (4 cm de largo); disco plano o en forma de copa de 5-20 mm (9 mm) de diámetro, de 30 a 60 radios (400 μm de diámetro de cada radio); margen exterior del radio redondeado con diente central o espina; corona superior compuesta de

proyecciones discretas con dos cicatrices capilares extremadamente tenues; corona inferior como proyecciones discretas con ápices bifurcados.

Rhodophyta

Clase: Florideophyceae

Orden: Corallinales

Familia: Hydrolithaceae

Hydrolithon farinosum (J.V.Lamouroux) Penrose y Y.M.Chamberlain

Figura 23. E.

Talo como costra muy calcificada de 2 a 5 mm de espesor o formando nódulos en forma de protuberancias (de 5 a 8 mm de diámetro, 3 a 5 mm de alto); color purpura; células de la capa superficial de 6-18 μm (10-25 μm) de diámetro; células en subsuelo mal definidas de 8-12 μm de diámetro; conceptáculos hemisféricos de 300-400 μm de diámetro (120 μm).

Orden: Gelidiales

Familia: Gelidiaceae

Gelidium americanum (W.R.Taylor) Santelices

Figura 23. F-G.

Talo gregario, duro, como césped denso, de 0.5 a 2 cm de alto; color granate oscuro opaco; firmemente sujeto por rizomas rastreros; hojas cilíndricas en la parte inferior, en forma de correa en la parte superior, de hasta 1 mm (0.5 mm) de ancho; ramillas

escasas irregulares alternas a pinnadas; células medulares de 10 a 20 μm de diámetro (50-75 μm); células superficiales redondeadas a angulares de 10 a 20 μm de diámetro.

Orden: Nemaliales

Familia: Galaxauraceae

Dichotomaria marginata (J.Ellis y Solander) Lamarck

Figura 24. A-B.

Talo tupido, de 5-20 cm (6.7cm) de alto; color rojo crema; ramificación dicotómica; calcificación moderada; láminas de 1-3 mm (3mm) de ancho; planas, lisas, a menudo con débiles bandas transversales; filamentos medulares de 8-15 μm (10 μm) de diámetro; corteza de 2-3 (3) células de espesor; células más internas de 25-64 μm de diámetro.

Orden: Gigartinales

Familia: Cystocloniaceae

Hypnea spinella (C.Agardh) Kützinger

Figura 24. C-D.

Talo erecto o en marañas, de hasta 3 cm de alto (8 cm) color marrón rojizo; ramificado en todas direcciones. Ramas de 0,4-1 mm de diámetro (8 mm), cilíndrica y con ramillas con forma de espina de hasta 2,5 mm de largo. Ápices puntiagudos no curvados. Células medulares de paredes gruesas irregulares a ovaladas de 100-

350 μm de diámetro (180-220 μm) rodeando una célula central de paredes gruesas evidente 70-80 μm de diámetro (100 μm). Corteza de 1-2 células de espesor.

Familia: Solieriaceae

Eucheumatopsis isiformis (C.Agardh) Núñez-Resendiz, Dreckmann y Senties

Figura 24. E-F.

Talo conspicuo, grande, duro, carnososo, de 16 a 70 cm de alto; color amarillo pajizo pálido a marrón rojizo claro; ramificación generalmente escasa, irregular; ramas cilíndricas, de 2 a 8 mm de diámetro, con proyecciones en forma de espinas dispersas o verticiladas, rara vez lisa; células medulares ovaladas, de 12 a 60 μm de diámetro, de paredes delgadas incoloras, de tamaño decreciente hacia la superficie; filamentos centrales de 3-6 μm de diámetro, apiñados de paredes gruesas, enredados.

Meristotheca spinella Núñez-Resendiz, Dreckmann y Senties

Figura 24. G-H.

Talo de 20-35 cm de alto; color rojo oscuro; ramificación dicotómica, alternada, opuestos o lateralmente; ramas de 550 – 750 μm (0.2-3 mm); corteza exterior con cuatro o cinco capas de células; células medulares 160 – 290 μm de diámetro; con filamentos medulares.

Orden: Gracilariales

Familia: Gracilariaceae

Gracilaria cornea J.Agardh

Figura 25. A-B.

Talo erecto, grueso, rígido y gomoso, a menudo irregular y nudoso de hasta 25 cm de alto (11 cm), moteado de amarillo pajizo pálido; rosa o verde pálido: ramificación generalmente abundante, irregular. Presenta ramas variables cortas y rechonchas a largas y delgadas, algo aplanadas. Células medulares de 100-320 μm de diámetro (300-350 μm) que se van haciendo más pequeñas hacia la superficie. Células superficiales u ovaladas o en forma de lágrima de 10-15 μm de diámetro. De tetrasporangios divididos en cruz.

Orden: Rhodymeniales

Familia: Champiaceae

Coelothrix irregularis (Harvey) Børgesen

Figura 25. C-D.

Talo similar a un césped, fibroso, enredado de hasta 3 cm de alto (3.5 cm), de color azul iridiscente brillante, ramificación irregular. Ramas cilíndricas de 0,3-0,8 mm de

diámetro (2 mm), rígidas; ápices afilados, puntiagudos. Presentan una cavidad central llena de gel mucilaginoso transparente, células glandulares esféricas en forma de masa que se proyectan hacia la cavidad, corteza de 4-6 células de espesor (siete células). Las células internas que recubren la cavidad de 45-80 μm de diámetro (50-60 μm), 120-200 μm de largo; células superficiales de 16-27 μm de diámetro (20 μm).

Orden: Ceramiales

Familia: Ceramiaceae

Centroceras clavulatum (C.Agardh) Montagne

Figura 25. E-F.

Talo filamentoso, en mechones sueltos y ondulados, de hasta 20 cm de largo, de color marrón oscuro; ramificación estrechamente dicotómica; ápices bifurcados, ligeramente curvados, hacia adentro, en forma de pinza. Ramas de 50-150 μm de largo (150 μm); células corticales en una capa, rectangulares, de longitud uniforme en toda su extensión, alineadas longitudinalmente. Articulaciones verticiladas con espinas; células corticales en dos capas espinas caducas o desgastadas con la edad.

Familia: Delesseriaceae

Dasya cf. pedicellata. C. Agardh

Figura 25. G-H

Talo erecto u ondulado, delicado, suave de hasta 90 cm de alto; color rojizo brillante a rosado; ramificación alterna generalmente escasa; ramas largas de 2-6 mm de diámetro (0.5-1 mm); ramillas filamentosas de 2-7 mm de largo (510 μ m de diámetro), 2-3 veces ramificados de manera dicotómica; estiquidia tetraesporangial en forma de lanza de 80-160 μ m de diámetro; tetraesporangios esféricos de 40-80 μ m de diámetro (50 μ m).

Dasya cf. crouaniana J.Agardh

Figura 26. A-B.

Talo erecto, de hasta 7 cm de alto, de color verde-marrón a rojizo-rosado; ramificación ampliamente dicotómica a irregular, con ramas de 0,5-0,7 mm de diámetro, cortijadas, escasamente cubiertas por ramillas finas proximalmente, más densamente cubiertas distalmente. Ramillas filamentosas, de 1-2 mm de largo. 1-3 veces ramificadas dicotómicamente. Células basales de 18-20 μ m de diámetro, 20-40 μ m de largo; células apicales de 5-12 μ m de diámetro a 30 μ m de largo (célula central de 140 μ m de diámetro y células pericentrales de 250-300 μ m de diámetro).

Dasya ocellata (Grateloup) Harvey.

Figura 26 C-D.

Talo delicado, esponjoso, suave de hasta 8 cm de alto; color rojo púrpura; ramificación alterna, generalmente escasa; ramas de hasta 0.3 mm de diámetro (200 μ m); corticadas, densamente cubiertas por penachos en el ápice de la rama

por ramitas finas; ramillas finas, parecidas a pelos, filamentosas de hasta 5 mm de largo; células pericentrales cortas de 30 – 80 μm de diámetro (70 μm) y 60- 140 μm de largo (110 μm).

Familia: Rhodomelaceae

Digenea mexicana G-H.Boo y D.Robledo

Figura 26. G-H.

Talo de 10.5 cm de altura, duras y cartilaginosas; haces vasculares de desnudas en las partes inferiores; ejes dicotómicos o raramente tricotómicos ramificados; ejes y ramas usualmente muy revestidas de ramillas; ramillas polisifónicas, con células axiales de 20-30 μm de diámetro; de ocho a nueve células pericentrales (ocho) rodeadas por células corticales superficiales oblongas.

Digenea arenahauriens C.W.Schneider, Hamzeh y G.W.Saunders

Figura 26. E-F.

Talo rígido, cartilaginoso, de hasta 7.3 cm de altura (3.5 cm); color violáceo claro a oscuro a marrón rojizo; filamentos rizoide los fusionados en sujetadores gruesos en forma de almohadillas; ejes directos e indeterminados, hileras axiales policifónicas, ramificaciones dicotómicas a irregularmente, cubiertos densamente con ramas delgadas y nervudas de hasta 7.7 mm de largo; ramas determinadas polisifónicas, con células axiales de 27-78 μm , rodeadas por 8-12 células pericentrales, de 14-38 μm de diámetro.

Alsidium seaforthii (Turner) J.Agardh

Figura 27. A-B.

Talo erecto y tupido de 8 a 20 cm de altura (6cm); color púrpura rojizo, de textura firme; membranoso en etapas tempranas, sub cartilaginoso en partes más longevas; ejes complanados que derivan en ramificaciones dísticas; Entre seis y ocho células pericentrales (7 - 8 células de 150 μ m de diámetro).

Laurencia intricata J.V. Lamouroux

Figura 27. C-D.

Talo solitario de 5-25 cm (6.8 cm) de alto; color amarillo-marrón; carnoso, flácido, solitario, cilíndrico; ramillas de 0,4-0,8 mm (0.4 mm) de diámetro cilíndricas rara vez en forma de masa; irregularmente alternas, ocasionalmente opuestas; ápices ligeramente curvos hacia abajo con mechones de filamentos finos; tetraesporangios de hasta 120 μ m de diámetro (células de la superficie de 30 μ m de diámetro)

Laurencia microcladia Kützing

Figura 27. E-F.

Talo tupido de hasta 10 cm de altura; color verde pálido a verde púrpura, ocasionalmente con las puntas rosadas; ramificación densa, alterna a irregular; ramas cilíndricas, de 02 a 1.5 mm de largo, parecidas a verrugas a menudo hinchadas; células superficiales o baladas de 30 a 60 μ m de diámetro; células medulares de 100-120 μ m de diámetro incoloras.

Yuzurua poiteaui (J.V. Lamouroux) Martin-Lescanne

Figura 28. A-B.

Talo de 20 cm (21 cm) de largo; de color beige pálido a rosa, ramificaciones muy alternas en pares hasta irregulares, abundantes, ramas cilíndricas a ligeramente aplanadas de 0,5-2 mm (0.5 mm) de largo; ápices con mechones de filamento fino, caducifolios y ramificados dicotómicamente; células superficiales de irregularmente redondas a oblongas de 20-30 μm de diámetro (célula central de 50 μm de diámetro y pericentrales de 100-200 μm de diámetro).

Polysiphonia binneyi Harvey

Figura 27 G-H.

Talo filamentoso, fino, epifito, en grupos laxos, de 3 hasta 15 cm de alto (10 cm), de color marrón rojizo; ramificación alterna e irregular. Eje erecto de 380 μm de diámetro (300 μm) en la base, rígido, afinándose distalmente, de cuatro células pericentrales; Ramitas laterales que reemplazan a los filamentos apicales.

Ochrophyta

Clase: Phaeophyceae

Orden: Dictyotales

Familia: Dictyotaceae

Dictyota pinnatifida Kützting

Figura. 28. E-F.

Talo tupido, erecto, de hasta 15 cm de alto (5 cm), de color marrón amarillento oscuro; ramificación alterna a irregular, ápices inicialmente ramificados dicotómicamente. Laminas en forma de correa de 2-4 mm de ancho (3 mm):

márgenes lisos: ápices romos o redondeados. Medula con dos (hasta cinco) células de espesor en los márgenes, más delgada en la mitad de la lámina; Células rectangulares, de 50-80 μm de espesor (100 μm), dispuestas en filas. Células superficiales de 10-20 μm de espesor (20 μm) en filas longitudinales.

Dictyota pulchella Hörnig y Schnetter

Figura 28. C-D.

Talo erecto, formando matas tupidas y enredadas de hasta 10 cm (4.6 cm) de altura; color marrón, a menudo con iridiscencia verde; ramificación ampliamente dicotómica; láminas de 3-5 mm (25 mm) de ancho, volviéndose progresivamente más estrecha en cada División; células medulares en una capa, rectangulares, 120-200 μm (60 μm) de espesor; células superficiales rectangulares, 20-30 μm (30 μm) de espesor; esporangios solitarios dispersos (80 μm de diámetro).

Padina pavonica (Linnaeus) Thivy

Figura 28. G-H.

Talo en racimos en forma de hojas de hasta 22 cm de alto y 37 cm de ancho; color marrón; láminas en forma de abanico de hasta 12 cm (2 cm) de ancho; bordes extremadamente curvados con bandas moderadamente calcificadas; márgenes de dos capas de células lámina principal de 3-4 células de espesor (de 30-60 μm de largo); soros esporangiales 90-140 μm de diámetro.

Orden: Fucales

Familia: Sargassaceae

Sargassum cf. cymosum C.Agardh

Figura 28. I-J.

Talo de hasta 1 m (17 cm) de longitud; color café claro a marrón; formando arbustos; ejes principales lisos con espinas; hojas de 3-8 mm (2 cm) de diámetro y 2-6 cm (1.1 cm) de longitud; numerosas, planas, estrechas, firmes; nervadura central prominente; márgenes dentados (seis a ocho); aerocistos numerosos, redondeados a ovalados, 3-6 mm (4 mm) de diámetro.

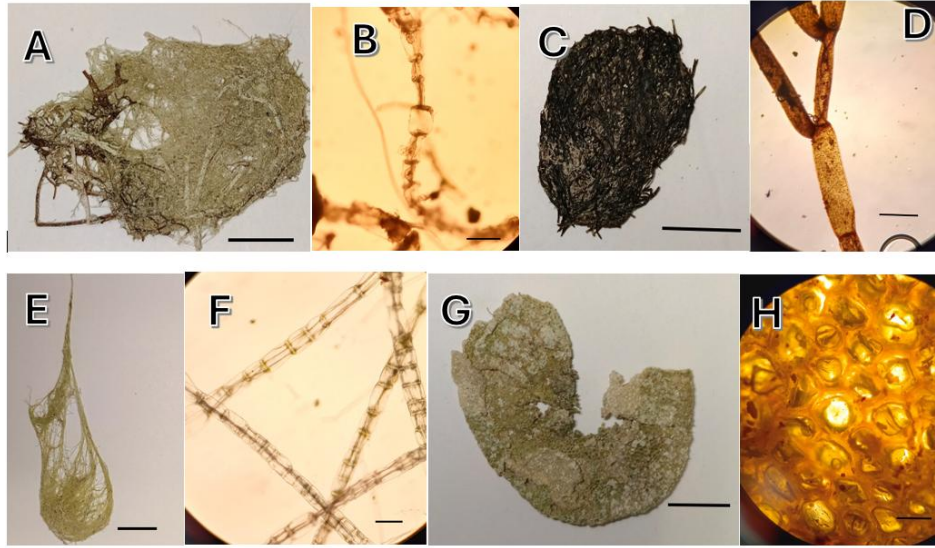


Figura 15. A-B. *Ulva intestinalis*, A. Hábito. Escala= 1cm B. Células en cadena. 200 µm; C-D. *Cladophora catenata*, C. Hábito. Escala= 1 cm D. Sifones. 200 µm; E-F. *Chaetomorpha gracilis*. E. Hábito. Escala= 2 cm. F. Células del filamento. Escala= 200 µm; G-H. *Dictyosphaeria cavernosa*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Células superficiales. Escala= 400 µm.

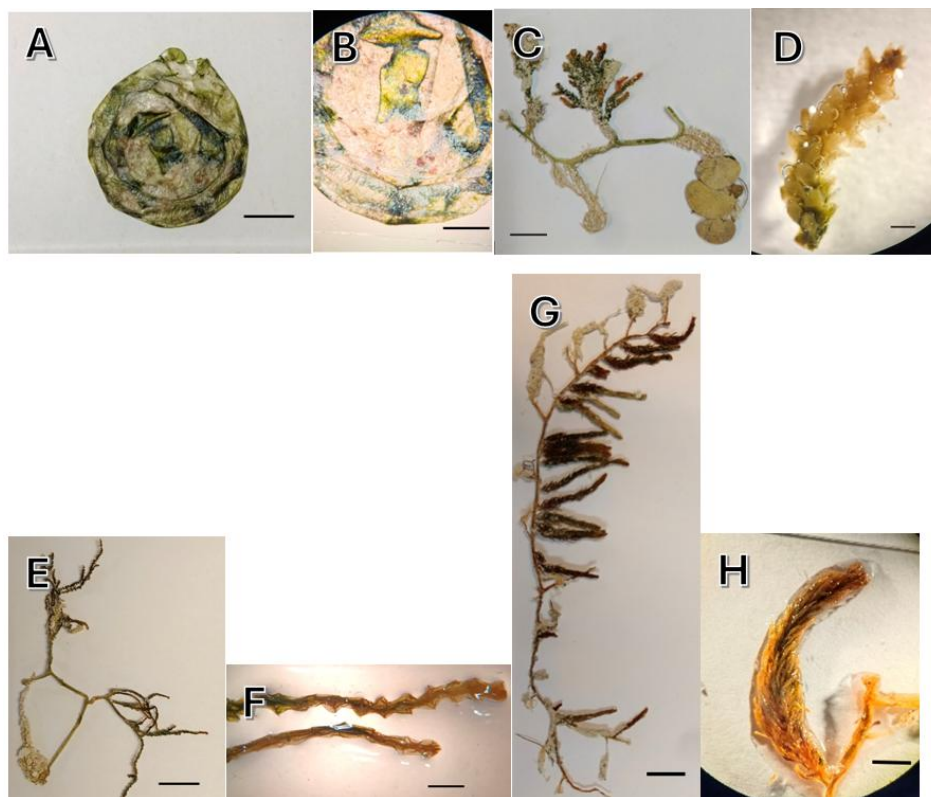


Figura 16. A-B. *Ventricaria ventricosa*, A. Hábito. Escala= 5 cm B. Acercamiento a la célula macroscópica. 3mm; C-D. *Caulerpa cupressoides*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Ramilla. Escala= 1 mm; E-F. *Caulerpa cupressoides* var. *flabellata*. E. Hábito. Escala= 1 cm. F. células medulares. Escala= 3 mm; G-H. *Caulerpa lanuginosa*. G. Hábito. Escala= 2cm. H. Ramilla. Escala= 3 mm.

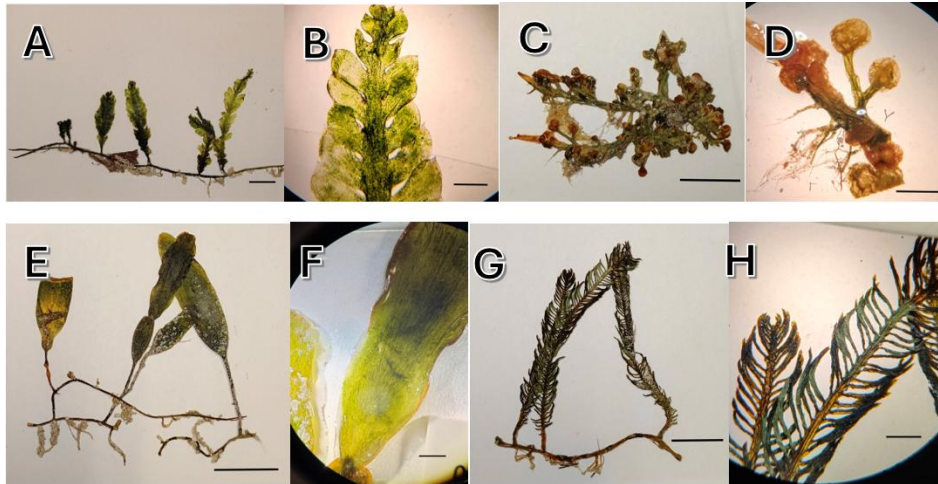


Figura 17. A-B. *Caulerpa mexicana*, A. Hábito. Escala= 1 cm B. Ramillas de la fronda. 2mm; C-D. *Caulerpa microphysa*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Ramillas. Escala= 3 mm; E-F. *Caulerpa prolifera*, E. Hábito. Escala= 2 cm F. fronda. Escala 3 mm; G-H. *Caulerpa sertularioides*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Ramillas. Escala= 3 mm.

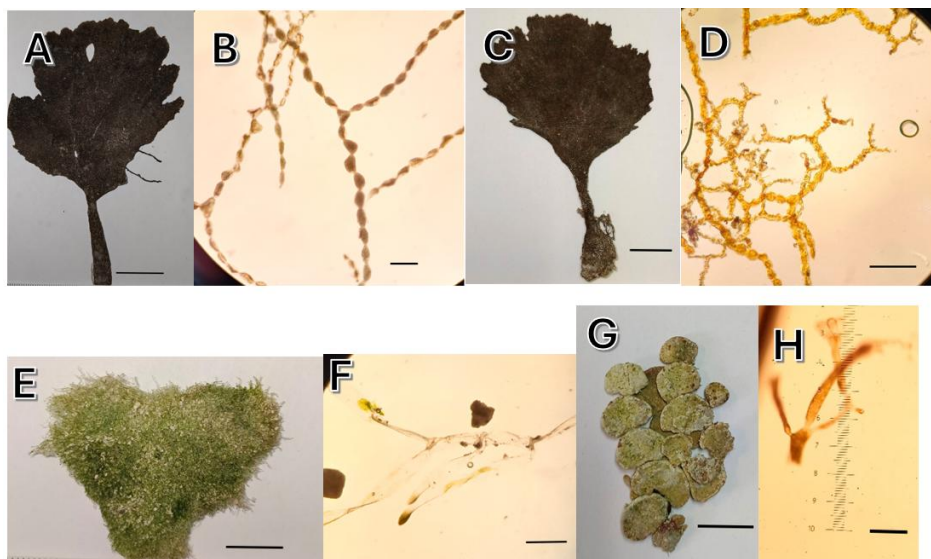


Figura 18. A-B. *Avrainvillea nigricans*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Sifones de la fronda. Escala= 100 μ m; C-D. *Avrainvillea silvana*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Sifones de la fronda. Escala= 200 μ m; E-F. *Boodleopsis verticillata*, E. Hábito. Escala= 1 cm F. Sifones. 300 μ m; G-H. *Halimeda gracilis*. G. Hábito. Escala= 2cm H. Utrículo. Escala= 100 μ m.

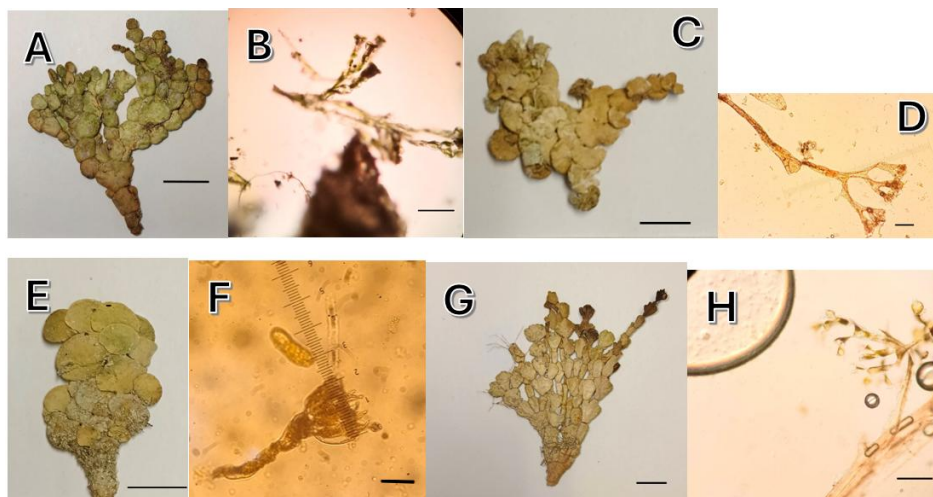


Figura 19. A-B. *Halimeda monile*, A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Utrículos. Escala= 200 μm ; C-D. *Halimeda opuntia*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala=200 μm ; E-F. *Halimeda scabra*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala= 100 μm ; G-H. *Halimeda simulans*. G. Hábito. Escala 2 cm. H. Utrículos. Escala 200 μm .

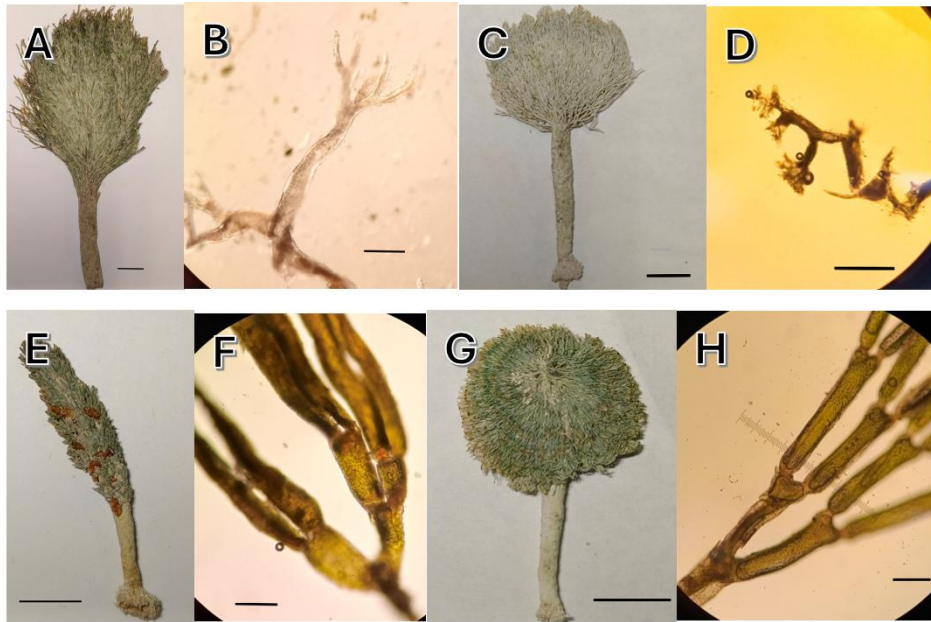


Figura 20. A-B. *Penicillus dumetosus*. A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Utrículos del estípide. Escala= 200 µm; C-D. *Penicillus lamouroxii*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Utrículo. Escala= 400 µm; E-F. *Rhipocephalus oblongus*. E. Hábito. Escala= 1cm F. Sifón. Escala= 200 µm; G-H. *Rhipocephalus phoenix*. G. Hábito. Escala= 1cm. H. Sifón. Escala= 140 µm.

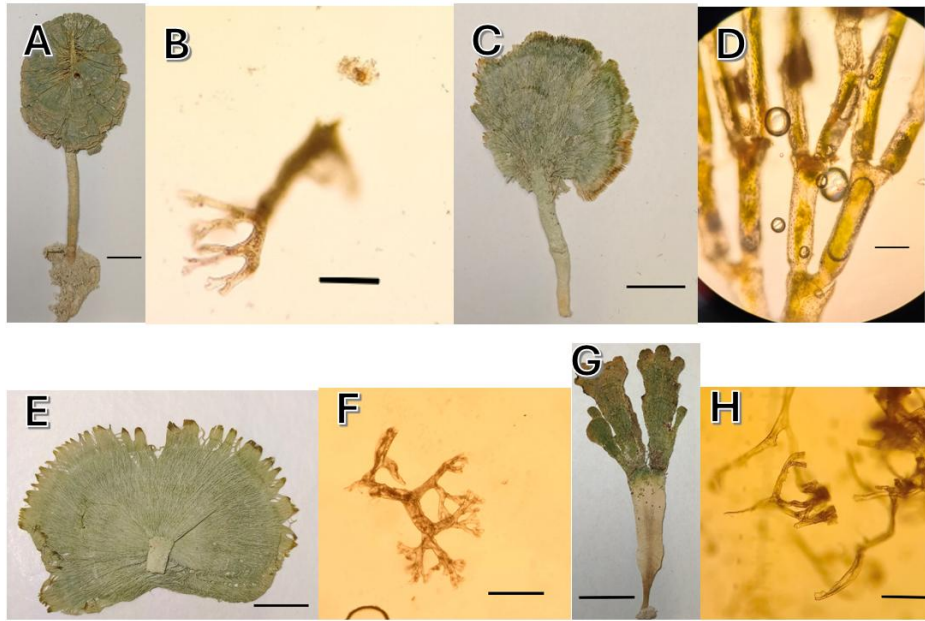


Figura 21. A-B. *Rhipocephalus phoenix f. brevifolius*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Utrículo. Escala= 100 μ m; C-D. *Rhipocephalus phoenix f. longifolius*. C. Hábito. Escala= 1 cm. D. Sifones. Escala= 200 μ m; E-F. *Udotea cyathiformis f. infundibulum*. E. Hábito. Escala= 1cm. F. Utrículos del estípide. Escala= 200 μ m; G-H. *Udotea dixonii*: G Hábito. Escala 2cm; H. Utrículo. Escala= 100 μ m.

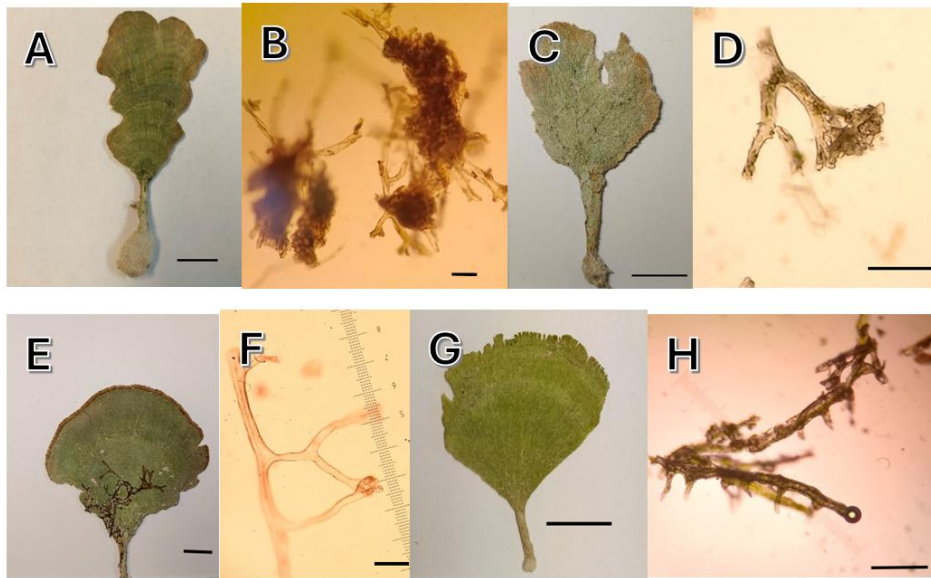


Figura 22. A-B. *Udotea dotyi*: A. Hábito. Escala = 2cm; B. Utrículo. Escala= 50 μ m; C-D. *Udotea fibrosa*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. utrículo. Escala=100 μ m; E-F. *Udotea flabellum* E. Hábito. Escala= 1cm. F. Utrículo del estípide. Escala= 100 μ m; G-H. *Udotea luna*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Sifones de la fronda. Escala= 200 μ m.

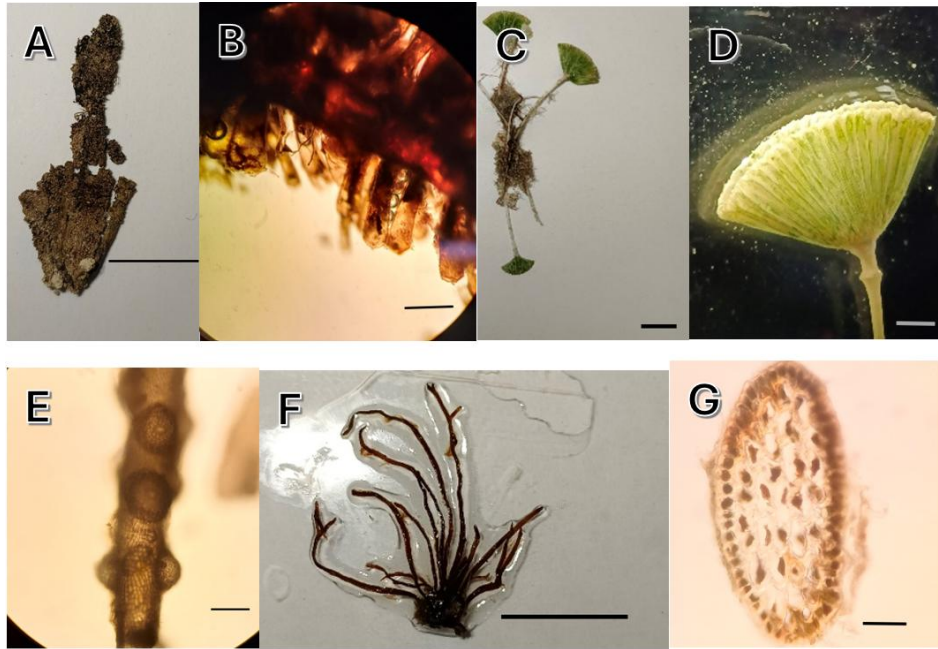


Figura 23. A-B. *Neomeris annulata*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Ramilla. Escala= 260μm; C-D. *Acetabularia schenckii*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Fronda. Escala= 1mm; E. *Hydrolithon farinosum*. E. Hábito sobre *Ulva intestinalis*. Escala= 200 μm; F-G. *Gelidium americanum*. F. Hábito. Escala= 1 cm. G. células medulares. Escala= 200 μm.

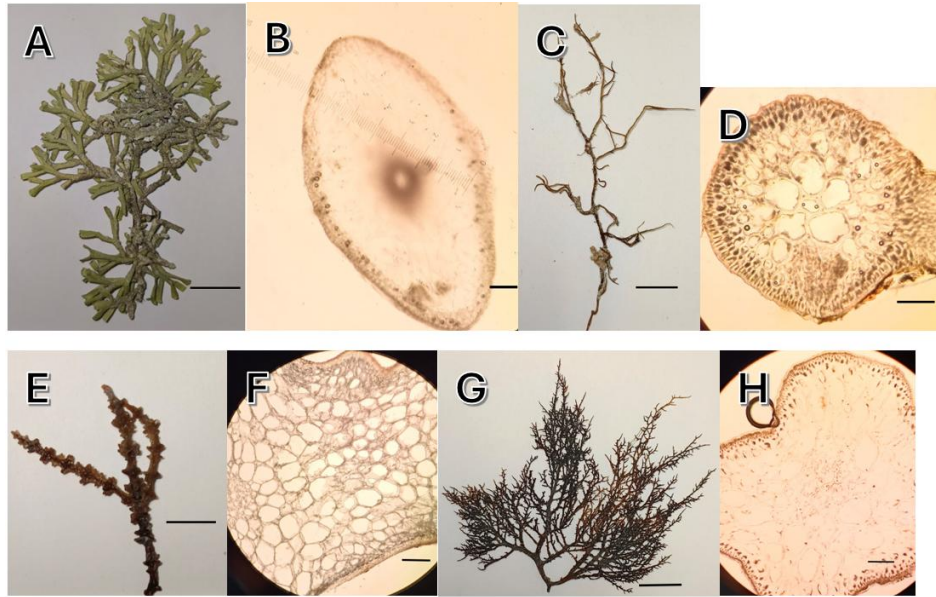


Figura 24. A-B. *Dichotomaria marginata*. A. Hábito. Escala= 1cm. B. Células medulares. Escala= 100 μ m; C-D. *Hypnea spinella*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Células medulares. Escala= 200 μ m; E-F. *Eucheumatopsis isiformis*. E. Hábito. Escala= 1 cm F. células medulares. Escala= 200 μ m; G-H. *Meristotheca spinella*. G. Hábito Escala 2 cm. H. Células y filamentos medulares. Escala= 200 μ m.

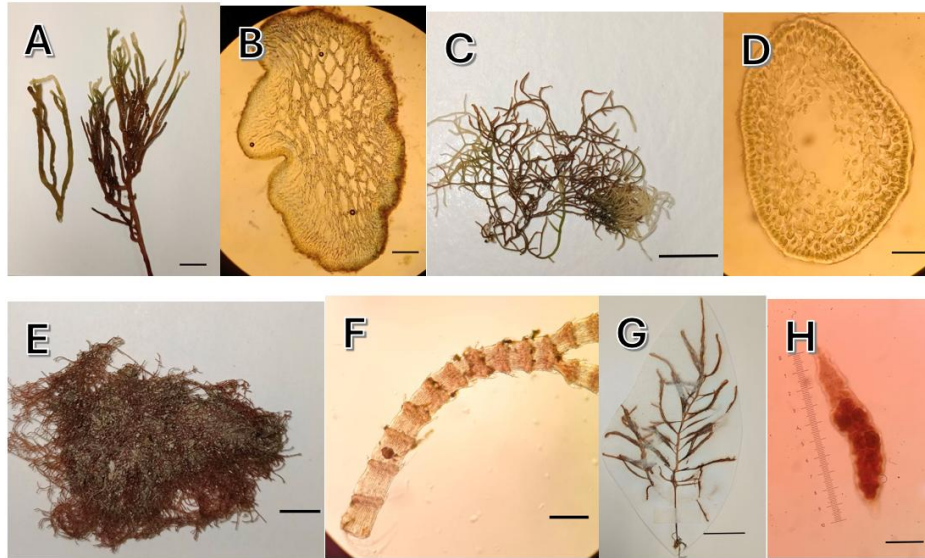


Figura 25. A-B. *Gracilaria cornea*. A. Hábito. Escala= 1 cm. B. Ramillas. Células medulares= 300 μ m; C-D. *Coelothrix irregularis*, C. Hábito. Escala= 1 cm D. Células de la medula. 200 μ m; E-F. *Centroceras clavulatum*. E. Hábito. Escala= 5 mm. F. Ramilla. Escala= 200 μ m; G-H. *Dasya cf. pedicellata*. G. Hábito. Escala= 2 cm. H. Stichidia tetraesporangial. Escala= 200 μ m.

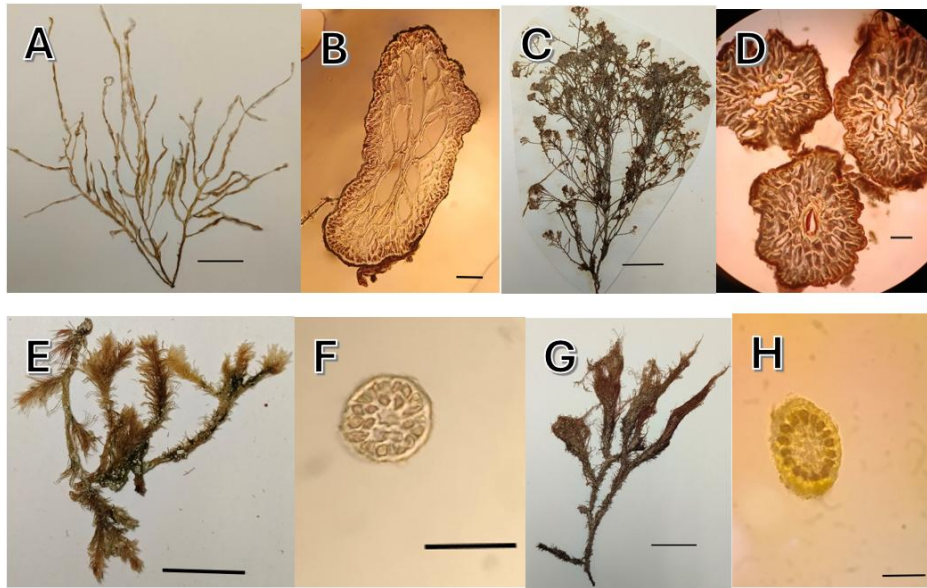


Figura 26. A-B. *Dasya cf. crouaniana*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Células medulares. Escala= 150 μ m; C-D. *Dasya ocellata*. C. Hábito. Escala= 2 cm. D. Células medulares. Escala= 200 μ m; E-F. *Digenea arenahauriens*, E. Hábito. Escala= 1 cm F. Células medulares. 100 μ m; G-H. *Digenea mexicana*, G. Hábito. Escala= 2 cm H. Células medulares. 100 μ m.

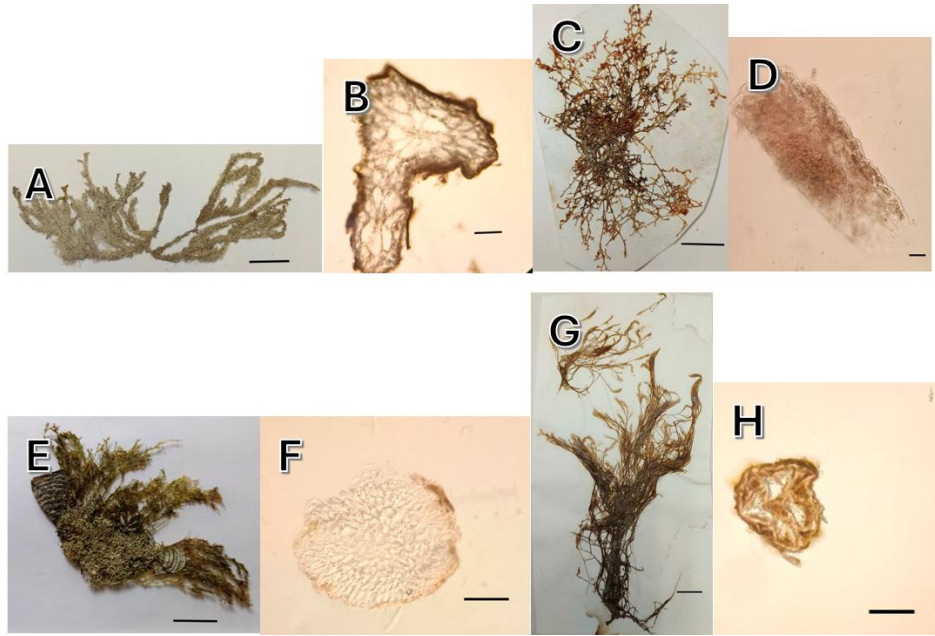


Figura 27. A-B. *Alsidium seaforthii*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. células medulares. Escala= 200 μm; C-D. *Laurencia intricata*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. Vista de tetraesporangio. Escala= 60 μm; E-F. *Laurencia microcladia* E. Hábito. Escala= 1 cm. F. Células medulaes. Escala= 200 μm; G-H. *Polysiphonia binneyi*. G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Células medulares. Escala= 50 μm.

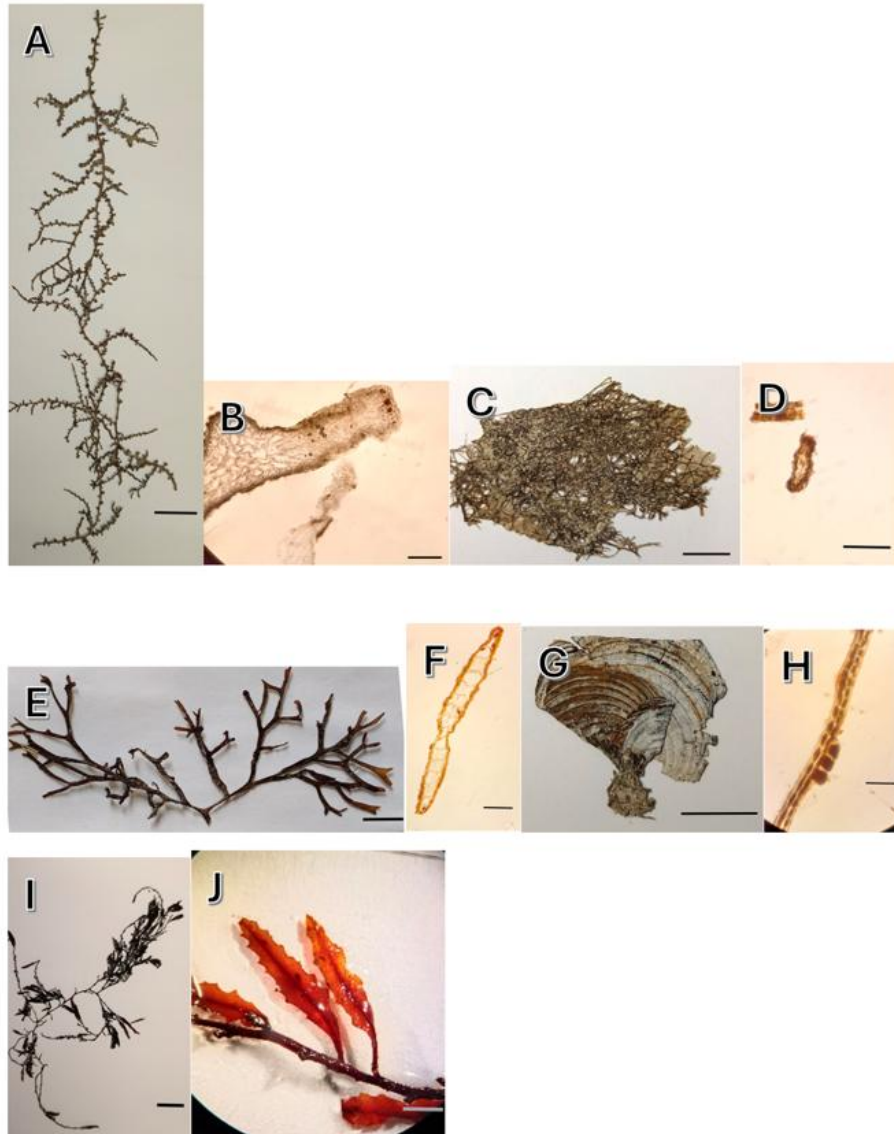


Figura 28. A-B. *Yuzurua poiteau*. A. Hábito. Escala= 2 cm. B. Células medulares. Escala= 200 μ m; C-D. *Dictyota pulchella*. C. Hábito. Escala= 1cm. D. corte transversal. Escala= 300 μ m; E-F. *Dictyota pinnatifida* E. Hábito. Escala= 1 cm F. corte transversal. Escala= 200 μ m; G-H. *Padina pavonica* G. Hábito. Escala= 1 cm. H. Utrículos. Escala= 100 μ m; I-J. *Sargassum cf. cymosum*. I. Hábito. Escala= 2cm. J. Filidio. Escala= 2mm.

Riqueza de especies de pastos marinos

Se identificaron tres especies de pastos marinos, todas pertenecientes a la División Magnoliophyta y distribuidas en un Orden, dos Familias y tres Géneros. La Familia con mayor representación fue Cymodoceaceae, con dos especies: *Halodule wrightii* Ascherson y *Syringodium filiforme* Kützing. Por su parte, la Familia Hydrocharitaceae estuvo representada únicamente por *Thalassia testudinum* K. D. Köenig. Las tres especies ya habían sido previamente registradas para la isla.

En el muestreo de 2018, las estaciones E2A, E3A, E4A y E6A registraron al menos dos especies de pastos marinos. En los años 2022 y 2023, las estaciones con al menos dos especies fueron E5A y E6A.

Se presentan las descripciones morfológicas de las especies presentadas, así como imágenes de los organismos y los cortes que se les realizaron para su respectiva identificación.

Descripciones morfológicas de pastos marinos

Magnoliophyta

Orden: Alismatales

Familia: Cymodoceaceae

Halodule wrightii Ascherson

Figura 29 A-B.

Plantas toscas, rígidas pero flexibles, parecidas a las hierbas, hasta 25 cm de altura (7 cm); verde hierba; sistema de raíces relativamente débil; flores y frutos pequeños; hojas de 0.5-1.5 mm de ancho (1.1 mm) y 5-20 cm de alto (6 cm); nervadura central llamativa; venas marginales paralelas presentes, pero, no tan notorias como la vena de la nervadura central; estolón extenso rastrero; raíces una a cuatro por nodo.

***Syringodium filiforme* Kützinger**

Figura 29. C-D.

Plantas toscas, rígidas, quebradizas, con hojas cilíndricas de hasta 45 cm de altura (20 cm); color verde hierba; flores y frutos pequeños, discretos. Tallos uno por nodo, con una a tres hojas; hojas de 1-2 mm de diámetro (1 mm) y 10-30 cm de largo (17 cm); haz vascular central rodeado por cinco a ocho canales (seis canales) de aire y dos haces vasculares centrales; estolón de 2 mm de diámetro.

Familia: Hydrocharitaceae

***Thalassia testudinum* K. D. Köenig**

Figura. 29 E-F.

Plantas erectas, toscas, parecidas a la hierba; de hasta 1 m de altura (40 cm), de color verde hierba. Hojas en forma de correa, 2-6 por vaina, 4-12 o hasta 15 mm de ancho (8 mm), un racimo por nudo. Venas 9-15 paralelas, conectadas por venas transversales perpendiculares en intervalos de 1 mm; márgenes lisos, distalmente con espinas microscópicas. Vainas de las hojas de 1,5-7,0 cm de largo. Estolón

extenso, rastrero, 3-6 mm de diámetro. Flores femeninos de 3-5 pétalos, ovaladas, dentadas finamente. Flores masculinas de 9 estambre.

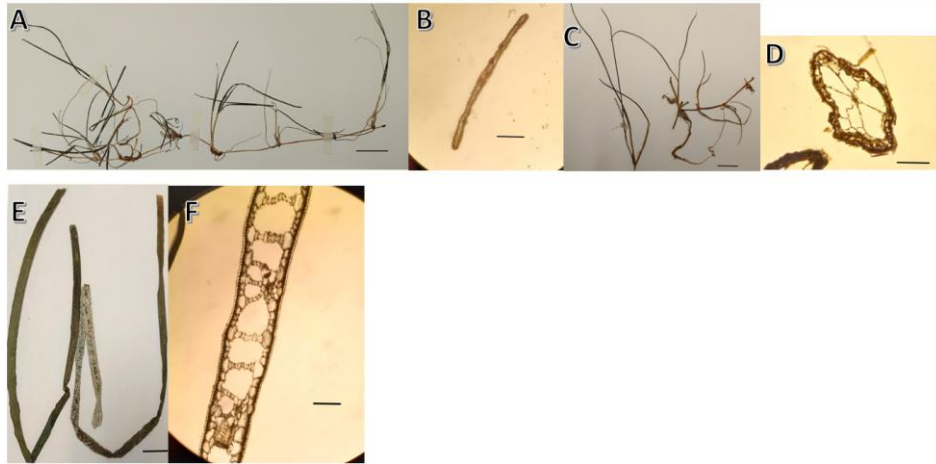


Figura 29. A-B. *Halodule wrightii*, A. Hojas, estolones y rizomas. Escala= 2 cm B. Corte transversal de hoja. 400 μ m. C-D; *Syringodium filiforme*. C. Hábito. Escala= 2 cm. D. Corte transversal de la hoja. Escala= 500 μ m. E-F; *Thalassia testudinum*. E. Hojas. Escala= 2cm. F. Corte transversal de la hoja. Escala 400 μ m.

Riqueza de especies de Invertebrados Marinos

Se identificaron 81 especies de invertebrados marinos en la zona noroeste de la isla de Cozumel. Del total registrado, Echinodermata fue el Phylum más diverso con 21 especies (26%), seguido de Cnidaria con 20 especies (25%), en tercer lugar, se ubicó Mollusca, representado por 17 taxa (21%), mientras que Arthropoda aportó 13 taxa (16%), finalmente, los Phyla Annelida y Porifera presentaron la menor riqueza específica, con seis (7%) y cuatro (5%) especies, respectivamente (Figura 30).

La clase con mayor riqueza de especies dentro del Phylum Echinodermata fue Echinoidea, representada por *Eucidaris tribuloides* Lamarck, *Diadema antillarum* Philippi, *Echinometra lucunter* Linnaeus, *E. viridis* A. Agassiz, *Lytechinus variegatus* Lamarck, *Tripneustes ventricosus* Lamarck, *Meoma ventricosa* Lamarck y *Mellita quinquiesperforata* Leske. En segundo lugar, se ubicó la clase Ophiuroidea, con *Breviturma paucigranulata* Devaney, *Ophiocoma echinata* Lamarck, *Ophioderma brevicaudum* Lütken, *O. appressum* Say, *Ophiothrix angulata* Say, *Ophiothrix oerstedii* Lütken y *Ophionereis reticulata* Say. La tercera clase más diversa fue Holothuroidea, representada por *Actinopyga agassizii* Selenka, *Holothuria (Halodeima) mexicana* Ludwig y *H. princeps* Selenka. Le siguió la clase Asteroidea, con *Linckia guildingi* Gray y *Oreaster reticulatus* Linnaeus. Finalmente, la clase Crinoidea estuvo representada únicamente por *Davidaster rubiginosus* Pourtalès (Tabla 11).

En el Phylum Cnidaria, la clase Anthozoa presentó la mayor riqueza, con especies como *Pterogorgia anceps* Pallas, *Gorgonia ventalina* Linnaeus, *Palythoa caribaeorum* Duchassaing & Michelotti, *Dichocoenia stokesii* Milne Edwards & Haime, *Meandrina danai* Milne Edwards & Haime, *Pseudodiploria strigosa* Dana, *Phymanthus crucifer* Le Sueur, *Condylactis gigantea* Weinland, *Actinoporus elongatus* Carlgren, *Porites astreoides* Lamarck, *P. porites* Pallas, *Siderastrea siderea* Ellis & Solander, *S. radians* Pallas y *Solenastrea bournoni* Milne Edwards & Haime. La clase Hydrozoa aportó especies como *Stylaster roseus* Pallas, *Millepora alcicornis* Linnaeus, *M. complanata* Lamarck, *M. striata* Duchassaing & Michelotti, *Pennaria disticha* Goldfuss y *Sertularella diaphana* Allman (Tabla 11).

Para el Phylum Mollusca, la clase más diversa fue Gastropoda, con *Aplysia dactylomela* Rang, *Fasciolaria tulipa* Linnaeus, *Spinoaglaja petra* Ev. Marcus, *Agathistoma hotessierianum* A. d'Orbigny, *A. fasciatum* Born, *Echinolittorina* sp. T. Habe, *Cyphoma gibbosum* Linnaeus, *Nerita tessellata* Gmelin, *N. versicolor* Gmelin, *N. peloronta* Linnaeus, *Eoacmaea pustulata* Helbling y *Fissurella nodosa* Born. Le siguió Polyplacophora, representada por *Acanthopleura granulata* Gmelin, *Chiton marmoratus* Gmelin y *C. viridis* L. Spengler. La clase Scaphopoda estuvo representada por *Dentalium* sp. Linnaeus, mientras que Cephalopoda lo estuvo por *Octopus vulgaris* Cuvier (Tabla 11).

En el Phylum Arthropoda, la clase más diversa fue Malacostraca, con *Panulirus argus* Latreille, *Percnon gibbesi* H. Milne Edwards, *Plagusia depressa* Fabricius, *Stenorhynchus seticornis* Herbst, *Porcellana sayana* Leach, *Pelia mutica* Gibbes, *Calappa flammea* Herbst, *Mithraculus fórceps* A. Milne-Edwards, *Leptuca pugilator* Bosc, *Petrochirus diogenes* Linnaeus y *Paguristes cadenati* Forest. Le siguieron Thecostraca, con *Balanus* sp. Costa, y Maxillopoda, con *Lepas anserifera* Linnaeus (Tabla 11).

Del Phylum Annelida, los organismos registrados pertenecen al grupo tradicionalmente denominado Polychaeta. Sin embargo, de acuerdo con la clasificación filogenética propuesta por Brusca *et al.* (2023), Polychaeta ya no es reconocida como una clase formal debido a su naturaleza parafilética. Las especies registradas se distribuyen actualmente en los clados Sedentaria y Errantia. El clado Sedentaria estuvo representado por *Sabellastarte magnifica* Shaw, *Bispira melanostigma* Schmarda, *B. brunnea* Treadwell, *Anamobaea orstedii* Krøyer,

Spirobranchus giganteus Pallas. Mientras que el clado Amphinomida estuvo representado por *Hermodice carunculata* Pallas. En el Phylum Porifera, solo se registró la clase Demospongiae, representada por *Ircinia strobilina* Lamarck, *Aplysina fistularis* Linnaeus, *Asteropus niger* Hajdu & van Soest y *Siphonodictyon xamaycaense* Pulitzer-Finali (Tabla 11).

En total, se identificaron 13 especies bioindicadoras o biomonitoras. Para Porifera, *Aplysina fistularis*; para Annelida, *Spirobranchus giganteus* y *Hermodice carunculata*; para Mollusca, *Octopus vulgaris* y *Acanthopleura granulata*; para Arthropoda, *Balanus* sp. y *Leptuca pugilator* y para Echinodermata, *Oreaster reticulatus*, *Eucidaris tribuloides*, *Diadema antillarum*, *Lytechinus variegatus*, *Mellita quinquiesperforata* y representantes de la Familia Holothuriidae.

Se identificaron 17 nuevos registros de especies de invertebrados marinos para la isla de Cozumel. Dentro del Phylum Porifera, los nuevos registros corresponden a *Asteropus niger* y *Siphonodictyon xamaycaense*. En el Phylum Cnidaria, las especies sin reportes previos para la isla son *Millepora striata*, *Pennaria disticha*, *Sertularella diaphana*, *Meandrina danai*, *Phymanthus crucifer*, y *Actinoporus elongatus*. En el Phylum Mollusca, los nuevos registros incluyen *Spinoaglaja petra*, *Agathistoma hotessierianum* y *Eoacmaea pustulata*. Respecto al Phylum Arthropoda, las especies añadidas al inventario de Cozumel fueron *Porcellana sayana*, *Calappa flammea* y *Leptuca pugilator*. Finalmente, dentro del Phylum Echinodermata, se registraron por primera vez *Breviturma paucigranulata*, *Mellita quinquiesperforata* y *Actinopyga agassizii* (Tabla 11).

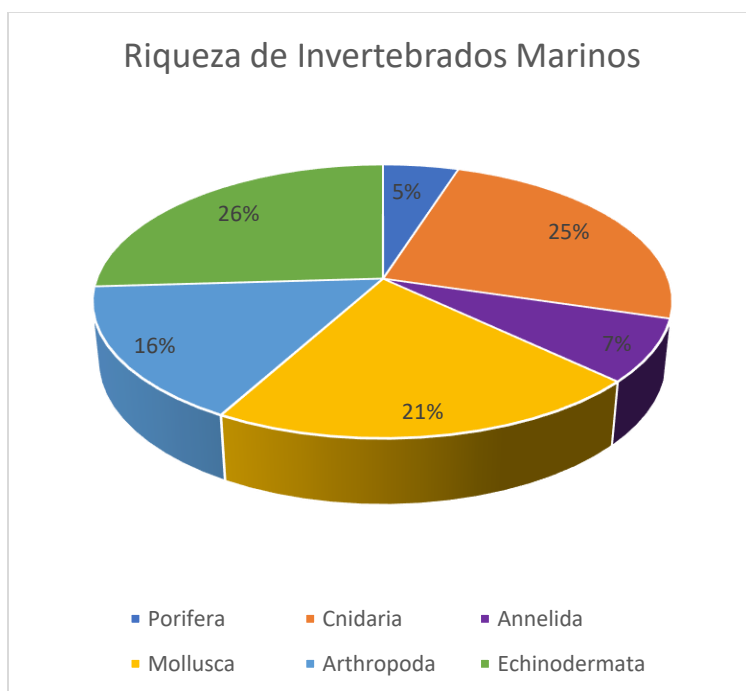


Figura 30. Riqueza de especies de invertebrados marinos por Phylum en la zona noroeste de Cozumel.

En 2018, la mayor riqueza de especies se registró en la estación E6A con 29 especies, seguida de E8A y E7A con 27 y 22 especies, respectivamente. En 2022, la estación E6B presentó la mayor diversidad con 41 especies, mientras que E6A ocupó el segundo lugar con 33 especies y E7A con 21. Para 2023, nuevamente E6B fue la estación más diversa con 39 especies, seguida de E7A con 27 y E6A con 26 especies (Tabla 11).

Tabla 11. Listado de especies invertebrados marinos de la zona noroeste de la isla de Cozumel. Presencia en los años de colecta (* registro nuevo).

Especies		2018	2022	2023
Phylum: Porifera				
Clase Demospongiae				
Orden: Dictyoceratida				
Familia: Ircinidae	<i>Ircinia strobilina</i>	X	X	X
Orden: Verongiida				
Familia: Aplysinidae	<i>Aplysina fistularis</i>	X	X	X
Orden: Tetractinellida				
Familia: Anocorinidae	<i>Asteropus niger*</i>	X	X	X
Orden: Haplosclerida				
Familia: Siphonodictyon	<i>xamaycaense*</i>	X	X	X
Phylum: Cnidaria				
Clase: Hydrozoa				
Orden: Anthoathecata				
Familia: Stylasteridae	<i>Stylaster roseus</i>	X	X	X
Familia: Mileporidae	<i>Millepora alcicornis</i>	X	X	X
	<i>Millepora complanata</i>	X	X	X
	<i>Millepora striata*</i>	X	X	X

Familia: Pennariidae	<i>Pennaria disticha*</i>	X	X	X
Orden: Leptothecata				
Familia: Sertularellidae	<i>Sertularella diaphana*</i>	X	X	X
Clase Anthozoa				
Orden: Malacalcyonacea				
Familia: Pterogorgiidae	<i>Pterogorgia anceps</i>	X	X	X
Familia: Gorgoniidae	<i>Gorgonia ventalina</i>	X	X	X
Orden: Zoantharia				
Familia: Sphenopidae	<i>Palythoa caribaeorum</i>	X	X	X
Orden: Scleractinia				
Familia: Meandrinidae	<i>Dichocoenia stokesii</i>	X	X	X
	<i>Meandrina danai*</i>	X	X	X
Familia: Faviidae	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	X	X	X
Orden: Actiniaria				
Familia: Phymanthidae	<i>Phymanthus crucifer*</i>	X	X	
Familia: Actiniidae	<i>Condylactis gigantea</i>	X	X	X
Familia: Capneidae	<i>Actinoporus elongatus*</i>	X	X	X
Orden: Scleractinia				
Familia: Poritidae	<i>Porites astreoides</i>	X	X	X
	<i>Porites porites</i>	X	X	X

Familia: Rhizangiidae	<i>Siderastrea siderea</i>	X	X	X
	<i>Siderastrea radians</i>	X	X	X
Familia: Scleractinia incertae sedis	<i>Solenastrea bournoni</i>	X	X	X
Phylum: Annelida				
(Tradicionalmente Clase:				
Polychaeta)				
Clado: Sedentaria				
Orden: Sabellida				
Familia: Sabellidae	<i>Sabellastarte magnifica</i>	X	X	X
	<i>Bispira melanostigma</i>			X
	<i>Bispira brunnea</i>	X	X	X
	<i>Anamobaea orstedii</i>	X	X	X
Familia: Serpulidae	<i>Spirobranchus giganteus</i>	X	X	X
Clado: Amphinomida				
Orden: Amphinomida				
Familia: Amphinomidae	<i>Hermodice carunculata</i>	X		X
Phylum: Mollusca				
Clase: Polyplacophora				
Orden: Chitonida				
Familia: Chitonidae	<i>Acanthopleura granulata</i>	X	X	X

	<i>Chiton marmoratus</i>			X
	<i>Chiton viridis</i>	X	X	X
Clase: Scaphopoda				
Orden: Dentaliida				
Familia: Dentaliidae	<i>Dentalium spp.</i>	X		
Clase: Gastropoda				
Orden: Aplysiida				
Familia: Aplysiidae	<i>Aplysia dactylomela</i>	X	X	X
Orden: Neogastropoda				
Familia: Fasciariidae	<i>Fasciolaria tulipa</i>	X	X	X
Familia: Aglajidae	<i>Spinoaglaja petra*</i>		X	
Orden: Trochida	<i>Agathistoma</i>			
Familia: Tegulidae	<i>hotessierianum*</i>	X		
	<i>Agathistoma fasciatum</i>	X	X	X
Orden: Littorinimorpha				
Familia: Littorinidae	<i>Echinolittorina spp</i>	X	X	X
Familia: Ovulidae	<i>Cyphoma gibbosum</i>	X	X	X
Orden: Cycloneritida				
Familia: Neritidae	<i>Nerita tessellata</i>	X	X	X
	<i>Nerita versicolor</i>	X	X	X

	<i>Nerita peloronta</i>	X	X	X
Familia: Eoacmaeidae	<i>Eoacmaea pustulata*</i>	X	X	X
Orden: Lepetellida				
Familia: Fissurellidae	<i>Fissurella nodosa</i>	X		X
Clase: Cephalopoda				
Orden: Octopoda				
Familia: Octopodidae	<i>Octopus vulgaris</i>			X
Phylum: Arthropoda				
Clase: Tecostraca				
Orden: Balanomorpha				
Familia: Balanidae	<i>Balanus spp</i>	X		
Clase: Malacostraca				
Orden: Decapoda				
Familia: Palinuridae	<i>Panulirus argus</i>			X
Familia: Percnidae	<i>Percnon gibbesi</i>	X	X	X
Familia: Plagusidae	<i>Plagusia depressa</i>	X	X	X
Familia: Inachoididae	<i>Stenorhynchus seticornis</i>	X	X	X
Familia: Porcellanidae	<i>Porcellana sayana*</i>			X

Familia: Epialtidae	<i>Pelia mutica</i>		X	
Familia: Calappidae	<i>Calappa flammea*</i>	X		
Familia: Mithracidae	<i>Mithraculus forceps</i>	X	X	X
Familia: Ocypodidae	<i>Leptuca pugilator*</i>	X	X	X
Familia Diogenidae	<i>Petrochirus diogenes</i>			X
	<i>Paguristes cadenati</i>	X	X	X
Clase: Maxillopoda				
Orden: Pedunculata				
Familia: Lepadidae	<i>Lepas anserifera</i>	X	X	X
Phylum: Echinodermata				
Clase: Crinoidea				
Orden: Comatulida				
Familia: Comatulidae	<i>Davidaster rubiginosus</i>		X	
Clase: Asteroidea				
Orden: Valvatida				
Familia: Ophidiasteridae	<i>Linckia guildingi</i>	X	X	X
Familia: Oreasteridea	<i>Oreaster reticulatus</i>	X	X	X
Clase: Ophiuroidea				
Orden: Ophiacanthida				
Familia: Ophiocomidae	<i>Breviturma paucigranulata*</i>	X	X	X

	<i>Ophiocoma echinata</i>	X	X	X
Orden: Ophiacanthida				
Familia: Ophiidermatidae	<i>Ophioderma brevicaudum</i>	X	X	X
Familia: Ophiidermatidae	<i>Ophioderma appressum</i>	X	X	X
Orden: Amphilepidida				
Familia: Ophiotrichidae	<i>Ophiothrix angulata</i>	X	X	X
	<i>Ophiothrix oerstedii</i>	X		
Familia: Ophionereididae	<i>Ophionereis reticulata</i>			
Clase: Echinoidea				
Orden: Cidaroida				
Familia: Cidariidae	<i>Eucidaris tribuloides</i>	X	X	X
Orden: Diadematoida				
Familia: Diadematidae	<i>Diadema antillarum</i>	X	X	X
Orden: Echinoida				
Familia: Echinoimetricidae	<i>Echinometra lucunter</i>	X	X	X
	<i>Echinometra viridis</i>	X	X	X
Orden: Camarodonta.				
Familia: Toxopneustidae	<i>Lytechinus variegatus</i>		X	X
	<i>Tripneustes ventricosus</i>		X	X

Orden: Spatangoida				
Familia: Brissidae	<i>Meoma ventricosa</i>			X
Orden: Echinolampadacea				
Familia: Mellitidae	<i>Mellita quinquiesperforata*</i>		X	
Clase: Holothuroidea				
Orden: Holothuriida				
Familia: Holothuriidae	<i>Actinopyga agassizii*</i>		X	
	<i>Holothuria</i> (Halodeima)			
	<i>mexicana</i>		X	X
	<i>Holothuria</i> (Theelothuria)			
	<i>princeps</i>		X	X

Descripción morfológica de invertebrados marinos

Phylum: Demospongiae

Clase Demospongiae

Orden: Dictyoceratida

Familia: Ircinidae

Ircinia strobilina Lamarck

Esponja esférica con una depresión en la parte superior en la cual se agrupan los ósculos, que miden de 4-6 mm de diámetro; llega a medir hasta 7 cm y un diámetro de 14 cm; color castaño claro; presenta pequeñas proyecciones cónicas que llegan a medir hasta 10 mm de altura.

Habita hasta una profundidad de 25 m y se encuentra distribuida en Cozumel zonas costeras del centro y sur de Quintana Roo Belice bermudas Brasil Colombia Cuba Jamaica y Puerto Rico.

Orden: Verongiida

Familia: Aplysinidae

Aplysina fistularis Pallas

tubos solitarios de color amarillo a naranja que pueden formar grupos; superficie suave y contorneada en aguas poco profundas normalmente se forman grupos de tubos más cortos a menudo con ramillas; en aguas profundas con mayor frecuencia

tubo solitarios sin ramillas; presentes en arrecifes, paredes y arena de 4.5 a 30 m abundante en Bahamas, Caribe; en Florida ocasionalmente.

Orden: Tetractinellida

Familia: Anocorinidae

Asteropus niger Hajdu y van Soest,

Esponja rodeada en forma de bola con superficie negra brillante; grupos de pequeñas aberturas excurrentes de color negro en la parte superior; la especie tiene un rango batimétrico considerable de 3 a 75 m de profundidad, distribuidos desde el Caribe hasta el Atlántico sureste tropical.

Orden: Haplosclerida

Familia: Siphonodictyon

Siphonodictyon xamaycaense Pulitzer-Finali

Altura de hasta 10 cm, gran parte de la estructura se encuentra debajo de la superficie, tubos blancos irregulares de media pulgada, que se estrechan hasta tener menos de un cuarto de pulgada. Generalmente presentes en zonas por debajo de los 30 m.

Phylum: Cnidaria

Clase: Hydrozoa

Orden: Anthoathecata

Familia: Stylasteridae

***Stylaster roseus* Pallas**

Colonias que forman estructuras de ramas en forma de abanico. Ramas cilíndricas que se estrechan desde la base hasta la punta; copas diminutas formadas por los pólipos de donde se alimentan y los pólipos urticantes que los rodean dando forma dentada a los tallos externos. Copas ocasionalmente en la base gruesa de las ramas. Color púrpura con la banda cerca de la base de la colonia y se desvanece a rosa y blanco hacia las puntas de las ramas, ocasionalmente completamente blancas.

Habitan mayormente en el sur de florida Bahamas y el Caribe.

Familia: Mileporidae

***Millepora alcicornis* Linnaeus**

Las colonias forman una estructura ramificada múltiple; ramas generalmente cilíndricas; ramifican en un solo plano, pero ocasionalmente en múltiples direcciones; a menudo se incrustan y crecen demasiado en las colonias de gorgonias adquiriendo su forma textura superficial lisa con numerosos poros; cuando los pólipos sobresalen aparecen como pelos finos y cortos; de color mostaza y marrón con puntas blancas.

Abunda principalmente en Florida, Bahamas y el Caribe, hasta 30 m de profundidad.

***Millepora complanata* Lamarck**

Colonias que forman láminas o placas delgadas y verticales que se forman a partir de una base incrustada; el borde de las láminas es desigual con múltiples

extensiones de color y textura de la superficie con numerosos poros estenopeicos; cuando los pólipos sobresalen aparecen como pelos cortos y finos de color mostaza y marrón; bordes de las hojas blancos.

Abunda mayormente en Florida, Bahamas y el Caribe en aguas poco profundas.

Millepora striata Duchassaing y Michelotti

Forman placas incrustantes sobre el sustrato; de hojas delgadas y verticales con crestas que se vuelven más distintas hacia los extremos superiores; las hojas de muchas colonias se las hojas de muchas colonias se unen; textura superficial lisa con numerosos poros; cuando los pólipos sobresalen, aparecen como pelos cortos y finos; de color mostaza a marrón; los bordes de la hoja ocasionalmente blancos.

Su distribución es rara en las costas del centro y Sudamérica, desde Belice hasta Venezuela incluidas islas costeras; habita en aguas turbias y poco profundas y en áreas de pastos marinos.

Familia: Pennariidae

Pennaria disticha Goldfuss

Altura de hasta 9 cm, ramas extendidas de forma alternada, en un solo plano desde un tallo central marrón y robusto; un solo pólipo en la punta de cada rama y tallo, pólipos adicionales a lo largo de las ramas; generalmente crecen en grupo.

Son comunes en Florida, Bahamas y ocasionalmente en el Caribe.

Orden: Leptothecata

Familia: Sertularellidae

Sertularella diaphana Allman

Ramas que se extienden alternativamente en un solo plano desde un tallo robusto de color marrón de hasta 14 cm de altura; los pólipos blancos se adhieren alternativamente a la parte superior e inferior de las ramas; solitario o en pequeños grupos en arrecifes de 4.5 a 30 m Común en Florida Bahamas y Caribe.

Clase Anthozoa

Orden: Malacalcyonacea

Familia: Pterogorgiidae

Pterogorgia anceps Pallas

Colonias grandes, tupidas y muy ramificadas. La sección transversal de una rama tiene forma de “Y” o “X”. Las ramas se estrechan desde la base hacia los extremos terminales y a menudo están retorcidas. Los extremos pueden tener ocasionalmente forma de hoja aplanada. Los pólipos se extienden desde los bordes de las ramas. Coloración oliva a marrón o gris, ocasionalmente morado o con tintes violáceos.

Común en algunas zonas del sur de Florida, Bahamas y el Caribe. Puede ser muy abundante en áreas localizadas.

Familia: Gorgoniidae

Gorgonia ventalina Linnaeus

Las colonias forman grandes abanicos y crecen en planos individuales; los abanicos se componen de una red interconectada de ramas estrechamente entrelazadas, redondas o ligeramente aplanadas en la superficie exterior; en Florida siempre es púrpura, mientras que en el resto comúnmente es púrpura, pero ocasionalmente es amarillo o marrón.

Su distribución es común en el sur de Florida, Bahamas y Caribe. Prefiere agua clara con algo de movimiento.

Orden: Zoantharia

Familia: Sphenopidae

Palythoa caribaeorum Duchassaing y Michelotti

Discos de color marrón a blanco rodeados de pequeños tentáculos que crecen como colonias conectadas, el disco de 1,2 cm. Forman esperas gruesas que cubren los arrecifes con el movimiento del agua, pueden cubrir los corales pétreos y matarlos.

Abundantes en el sur de florida y ocasionalmente en Bahamas y el caribe

Orden: Scleractinia

Familia: Meandrinidae

Dichocoenia stokesii Milne Edwards y Haime

Patrones de crecimiento de las colonias variables; generalmente forman cabezas o domos redondeados y placas aplanadas, ocasionalmente forman pilares, montículos con bultos y placas similares a guijarros. Coralitos muy variables. Pueden presentar coralitos pequeños que apenas sobresalen de la superficie y otros

que sobresalen notablemente. Forma de coralito variable; la mayoría circulares a elípticos y otros en forma de “Y”. Coloración marrón a marrón amarillento o tostado.

Habita en Bahamas y el Caribe y ocasionalmente en el sur de Florida.

Meandrina danai Milne Edwards y Haime

Colonias alargadas, algo baladas, con valle central largo y por lo general varios valles laterales; a menudo el valle central se divide en dos ramas en los extremos. No se adhiere al sustrato; las colonias desarrollan una proyección en forma de embudo en su superficie anterior que se extiende hacia la arena para anclar la colonia. De color amarillo mostaza amarillo oscuro; a veces con tintes verdosos.

Ocasionalmente está presente en el sur de Florida y el Caribe.

Familia: Faviidae

Pseudodiploria strigosa Dana

Colonias que forman placas de contornos suaves formando cúpulas hemisféricas. Los valles largos suelen estar conectados y ser enrevesados a excepción del borde de la colonia. Crestas uniformemente redondeadas, generalmente sin surco superior, Puede presentar un surco extremadamente fino especialmente cerca del borde de la colonia. De color verde a marrón, marrón amarillento y gris azulado; los valles suelen ser más claros o de un color contrastante.

Es abundante en Florida Bahamas y el Caribe.

Orden: Actiniaria

Familia: Phymanthidae

Phymanthus crucifer Le Sueur

Filas de verrugas con formas de cuentas que se extienden desde la boca hasta el borde circundante. Alrededor de 200 tentáculos cortos rayados o con bandas. Colores muy variables a menudo verdes. Se entierran en la arena o en grietas entre escombros y se retraen cuando algo los molesta.

Presentes ocasionalmente en Bahamas y el Caribe.

Familia: Actiniidae

Condylactis gigantea Weinland

Anémona más grande del Atlántico occidental de hasta 30 cm; tentáculos alargados de color blanco, gris o amarillento verdoso a menudo con puntas hinchadas que pueden ser de color rosado o morado; los tentáculos suelen tener puntas cónicas; cuerpos típicamente escondidos en grietas o cuevas.

Ubicados mayormente en arrecifes, malecones rocosos de 4.5 a 30 m de profundidad, comúnmente en Florida, Bahamas y el Caribe.

Familia: Capneidae

Actinoporus elongatus Carlgren

Columna corporal enterrada en arena, solo expone el disco oral aplanado, cubierto de numerosos tentáculos cortos; cuando está retraído, el disco oral aparece como rosquilla moteada; presenta coloración variable. Presente en arena y escombros entre 3 y 18 m.

Poco común en Jamaica, sur y este del Caribe.

Orden: Scleractinia

Familia: Poritidae

Porites astreoides Lamarck

Las colonias se incrustan en zonas de oleaje poco profundo, pero forman cabezas y cúpulas redondeadas en aguas más profundas; la superficie es grumosa y cubierta de pequeños corales muy juntos que dan a colonias una apariencia porosa; comúnmente de color amarillo a amarillo verdoso ocasionalmente de color beige a gris; los pólipos extendidos dan la apariencia a la colonia de suave y difusa.

La distribución es abundante a común en Florida, Bahamas y el Caribe; comúnmente a 4.5 y 24 m.

Porites porites Pallas

Coral que forma colonias ramificadas irregulares de hasta 30 cm de diámetro; las ramas tienen unos 2 cm de grosor y presentan al extremo formando ganchos con las puntas achatadas y ligeramente más gruesas; coloración generalmente gris, aunque en ocasiones puede aparecer azul.

Se distribuye principalmente en zonas someras del Atlántico occidental desde florida, Texas, México, Bahamas y Bermudas.

Familia: Rhizangiidae

Siderastrea siderea Ellis y Solander

Presenta forma de cabeza redondeada, cantos rodados o domos. La superficie cubierta por corallitos pequeños, generalmente simétricamente redondos y

punteados. Color gris claro a marrón; los coralitos de color uniforme que no son oscuros del centro. Presentes en arrecifes de aguas poco profundas a moderadas, entre 7.5 y 14 m.

Se distribuye mayormente en Florida, Bahamas y el Caribe.

Siderastrea radians Pallas

Colonias que suelen formar placas incrustantes, planas, ocasionalmente en forma de pequeñas cúpulas redondeadas. En aguas poco profundas pueden formar colonias sueltas con forma de huevo con desplazamiento por oleaje. Superficie cubierta por coralitos pequeños y con hoyuelos profundos que a menudo parecen “aplastados”. Color blanquecino a gris claro, ocasionalmente de color canela claro; con el centro del coralito de color oscuro. Presente en sustratos planos, rocosos y arenosos, arrecifes profundos y poco profundos. Rara vez por debajo de los 30 pies.

Se distribuye comúnmente en Florida, Bahamas y el Caribe.

Familia: Scleractinia incertae sedis

Solenastrea bournoni Milne Edwards y Haime

Las colonias forman cúpulas relativamente lisas, ocasionalmente con algunas protuberancias o protuberancias irregulares en su superficie; los bordes del coralinos sobresalen notablemente creando una apariencia ampollada; de color crema a bronceado claro a bronceado verdoso; los pólipos extendidos son de color tostado claro a marrón.

Distribución común a ocasional en el sur de Florida; poco común en Bahamas, Caribe; con presencia en el Golfo de México y la costa norte de Yucatán.

Phylum: Annelida

(Tradicionalmente Clase: Polychaeta)

Clado: Sedentaria

Orden: Sabellida

Familia: Sabellidae

***Sabellastarte magnifica* Shaw**

Presenta plumero más grande del caribe de hasta 15 cm de alto; radiolas dispuestas en un patrón circular doble; presentan bandas en tonos marrón, marrón rojizo, café, dorado y violeta rojizo; tubos parecidos a pergaminos a menudo enterrados; presentes en arrecifes y arena a menudo crecen a partir de cabezas de coral y dentro de esponjas hasta a 18 m de profundidad. De común a poco común en Florida, Bahamas y el Caribe.

***Bispira brunnea* Treadwell**

Gusano plumero de hasta 3 cm de altura; crecen en racimos; las coronas se extienden desde los tubos expuestos en forma de pergamino; coronas circulares de color blanco, café, marrón o morado; a menudo de dos tonos con centros más oscuros; bandas ocasionales; se presentan en arrecifes con cierto movimiento de agua de hasta 18 m. Común en Bahamas y el Caribe.

***Bispira melanostigma* Schmarda,**

Tamaño de hasta 3 cm. Presenta coronas que pueden ser de un solo color, rasgadas o con bandas de color marrón o violeta; tubos con forma de pergamino generalmente ocultos; manchas oscuras en los ocelos a menudo visible en los tallos de las radiolas.

Presentes ocasionalmente en Florida, Bahamas y el Caribe.

***Anamobaea orstedii* Krøyer**

Gusanos de hasta 5 cm de altura; presentan coronas ovaladas con división longitudinal creando mitades espejadas; de color marrón, anaranjado, granate y violeta a menudo con manchas y bandas blancas; los tubos suelen estar ocultos y generalmente se encuentran en solitario o en grupos pequeños en arrecifes de hasta 23 m. Son comunes en Florida Bahamas y el Caribe.

Familia: Serpulidae

***Spirobranchus giganteus* Pallas**

Presenta dos coronas de radiolos en espiral; la corona de hasta 14 cm los de altura; el opérculo de dos cuernos se extiende entre los radiolos; tubo calcáreo con una gran protuberancia en forma de púa; los colores y marcas son variables; gusanos sensibles al movimiento y retraen las coronas y cierran el opérculo; se presentan en arrecifes de hasta 30 m tubos generalmente encerrados en el coral vivo. Abundantes en Florida, Bahamas y Caribe circuntropical.

Clado: Amphinomida

Orden: Amphinomida

Familia: Amphinomidae

***Hermodice carunculata* Pallas**

Gusano de apéndice carnosos parecido a una barba en la cabeza (carúncula); mechones cortos de cerdas blancas y filamentos branquiales rojos recubren el cuerpo; color rojo, verde, amarillo o marrón; habita múltiples hábitats hasta los 40 m. Común en Florida Bahamas y el Caribe.

Phylum: Mollusca

Clase: Polyplacophora

Orden: Chitonida

Familia: Chitonidae

***Acanthopleura granulata* Gmelin**

Presentan cuerpo robusto y ovalado de alrededor de 30 a 76 mm; color generalmente café con bandeo longitudinal más oscuro en el área superior de las valvas intermedias y ocasional en las valvas anal y cefálica; el cinturón presenta manchones de café-negro y blanco intercalados con espículas grandes y gruesas y pequeñas más numerosas; del lado ventral se puede apreciar bien diferenciada la cabeza, boca y el manto. La distribución es desde el sur de Florida hasta las costas de Brasil.

***Chiton marmoratus* Gmelin**

Organismos de 50 a 70 mm de largo y 32 mm de ancho. De color variable que puede ser de café oscuro en todas las valvas verde claro con manchas longitudinales o en

zic-zag café oscuro y gris claro con líneas o manchas longitudinales verde oscuro. Valvas redondeadas, la valva encefálica convexa. Superficie entera de las valvas lisa, excepto por una microscópica textura sedosa.

Presente en Bahamas y el Caribe.

Chiton viridis Spengler

Forma ovalada de hasta 5 cm, de color crema a verde parduzco con valvas con vetas marrones; triangulo laterales con 4-5 costillas granuladas. Cintura de color crema con bandas marrones y escamas redondeadas.

Común en Florida Bahamas y el Caribe

Clase: Scaphopoda

Orden: Dentaliida

Familia: Dentaliidae

Dentalium sp. Linnaeus

Conchas en forma de colmillo de elefante; abierto en ambos extremos; la identificación de especies requiere una observación minuciosa. Presentes en fondos arenosos de hasta 30 m. Comunes en Florida Bahamas y el Caribe.

Clase: Gastropoda

Orden: Aplysiida

Familia: Aplysidae

Aplysia dactylomela Rang

Organismo de hasta 20 cm; color canela amarillento a verde con numerosos anillos negros; parapodios ondulados generalmente permanecen cerrados sobre el dorso; pueden descargar una nube inofensiva de tinta púrpura.

Presentes en Florida, Bahamas y el Caribe

Orden: Neogastropoda

Familia: Fasciariidae

***Fasciolaria tulipa* Linnaeus**

Concha de hasta 25 cm; fusiforme de color gris, verde o marrón con delgadas rayas espirales oscuras y líneas longitudinales; comúnmente con manchas negras a canela; cuerpo rojo, marrón o negro con motas blancas.

Presente ocasionalmente en Florida, Bahamas y el Caribe.

Familia: Aglajidae

***Spinoaglaja petra* Ev. Marcus**

Cuerpo estrecho y alargado de hasta 2.5 cm; de color de amarillo a marrón oscuro y ocasionalmente verde con algunas manchas amarillas y blancas; parapodios anchos; lóbulo lateral a cada lado de la cabeza; presenta dos lóbulos de la cola cortos y puntiagudos. Habita en arena poco profunda y es poco común en Florida, Bahamas y el Caribe.

Orden: Trochida

Familia: Tegulidae

Agathistoma hotessierianum A. d'Orbigny

Organismo de hasta 2 cm; concha ampliamente cónica con cuatro o cinco verticilos redondeados y lisos; moteado rojizo, tostado a negro con algunas manchas blancas; líneas espirales de rayas rojizas y blancas alternadas.

Presente en Florida, Bahamas y el Caribe.

Agathistoma fasciatum Born

Cuerpo cónico de hasta 2 cm; cuatro o cinco verticilos redondeados y lisos; rojizo de color canela a negro moteado con algunas manchas blancas; presenta líneas espirales de rayas alternas de color rojizo y blanco; se ubican principalmente debajo de rocas en agua poco profundas de hasta 6 m. Distribución en el Caribe, Bahamas y Florida.

Orden: Littorinimorpha

Familia: Littorinidae

Echinolittorina sp. Habe

Organismos de tamaño entre 2 a 50 mm de largo, conchas sólidas que tienen forma turbinada y presentan una textura variable, que va desde lisa hasta rugosa. Presentan o perfil o córneo con pocas vueltas y núcleo generalmente excéntrico. Coloración diversa a menudo compuesta por bandas o líneas axiales o espirales de diferentes colores.

Familia: Ovulidae

Cyphoma gibbosum Linnaeus

Presenta un manto de color blanco crema, a menudo cubierto con áreas rectangulares anaranjadas o grises con contornos negros, o un diseño similar a una huella digital anaranjada con márgenes negros, o áreas ovaladas negras con rayas verticales anaranjadas; presentan una “falda” blanca en el pie del manto con líneas oscuras; de la parte de abajo del caparazón hacia el borde de la falda a menudo presenta un color anaranjado adorado; el caparazón es de color blanco pulido que suele estar cubierto por un manto cerrado; juveniles más alargados. Común en Florida Bahamas y el Caribe.

Orden: Cycloneritida

Familia: Neritidae

Nerita tessellata Gmelin

Generalmente de talla pequeña a mediana; concha un reglamentada con cordones espirales lisos y manchas negras y blancas sobre los cordones, columela lisa y un opérculo negro.

Nerita peloronta Linnaeus

Organismos de hasta 5 cm, la concha es grande en comparación con otras especies de neritas; presenta espirales cortas; la superficie puede tener crestas espirales ligeramente elevadas. Opérculo rojo oscuro, granuloso en su lado interior. Color variable de amarillo, rojo o cremoso, con zigzags más oscuros. Presenta la zona de los dientes en el borde columelar de color rojizo.

Nerita versicolor Gmelin

Concha hasta 3 cm de largo; color base blanco lechoso a grisáceo con marcas irregulares a lo largo de la estructura las cuales usualmente son de color morado, rojo y negro; la apertura es en forma semilunar con el borde recto; columela con cuatro dientes prominentes, diente central ligeramente más grande; ofertó calcáreo y ligeramente cóncavo de color gris o marrón. Distribución desde florida hasta Brasil y en el caribe desde Bahamas hasta Trinidad y en Bermudas. En México abunda desde Yucatán y Quintana Roo.

Familia: Eoacmaeidae

Eoacmaea pustulata Helbling

Concha de hasta 2,5 cm; ovalada, gruesa y moderadamente elevada. Con ápice ligeramente puntiagudo (cerrado).; algunas costillas radiales bajas y gruesas, así como crestas concéntricas débiles; el exterior blanco con manchas o barras rojizas.

Es común en Florida Bahamas y el Caribe.

Orden: Lepetellida

Familia: Fissurellidae

Fissurella nodosa Born

Concha ovalada moderadamente elevada de hasta 4,5 cm de diámetro, con filas concéntricas de nódulos en 20 a 22 costillas radiales; margen profundamente festoneado; abertura en forma de mancuerna en el ápice.

Es común en el sur de Florida Bahamas y Caribe.

Clase: Cephalopoda

Orden: Octapoda

Familia: Octopodidae

Octopus vulgaris Cuvier

Pulpo de hasta 1 m de largo muy común en el arrecife; presenta brazos de tres a cuatro veces la longitud del cuerpo; se muestra un patrón reticulado de color marrón rojizo; puede alterar colores y los patrones rápidamente; textura de la piel relativamente suave pero cuando se camufla se puede volver áspera y rugosa; presenta anillo oscuro alrededor de cada ventosa. Se ubica en arrecifes y pastos marinos de 4.5 hasta 23 m de profundidad; ocasionalmente en Florida y común en Bahamas y Caribe.

Phylum: Arthropoda

Clase: Tecostraca

Orden: Balanomorpha

Familia: Balanidae

Balanus sp Costa

Crustáceos y cirrípedos que se caracterizan por poseer un caparazón duro con forma cónica el cual está formado por placas y una abertura la cual se puede cerrar debido a las placas móviles que presenta lo que protege al organismo de la desecación.

Clase: Malacostraca

Orden: Decapoda

Familia: Palinuridae

Panulirus argus Latreille

langosta de hasta 60 cm; color bronceado, blanco y negro, con grandes manchas blancas en el abdomen; dos cuernos blancos y negros entre los ojos; de juvenil presenta patas con bandas y una raya ancha en la espalda. Mayormente nocturno y en grupos; se ubica hasta 18 m Se ubica en Florida Bahamas y el Caribe.

Familia: Percnidae

Percnon gibbesi H. Milne Edwards

Presenta un caparazón plano de hasta 3 cm; moteado de color marrón rojizo con una línea vertical central de color amarillo a blanco; las patas para caminar presentan bandas largas que se extienden hacia los lados; presenta una línea amarilla horizontal que cruza el frente del caparazón debajo de los ojos; habita en costas rocosas poco profundas y se refugia debajo de las espinas de los erizos. Habita en costas del pacífico de Centroamérica y como especie invasora en el mediterráneo

Familia: Plagusiidae

Plagusia depressa Fabricius

Presenta un caparazón plano con largas patas para caminar que se extienden hacia los lados de hasta 2.5 cm; de color variable desde rojizo claro con numerosos puntos rojos oscuro y tubérculos grises, hasta verde oliva o verde azulado con tubérculos

de color marrón a negro; presenta flecos de color rojo a morado en las patas y puntas de las garras. Habita en las costas rocosas y pozas de marea. Es poco común en Florida Bahamas y el Caribe; también está presente en el Golfo de México.

Familia: Inachoididae

Stenorhynchus seticornis (Herbst

Cuerpo pequeño y triangular de hasta 6.5 cm; presenta franjas blancas, marrones y negras alternadas; patas largas y puntiagudas de color canela parecida a una araña; garras con puntas moradas; habita en muchos hábitats incluido arrecifes de hasta 40 m de profundidad. Abunda en Florida Bahamas y el Caribe.

Familia: Porcellanidae

Porcellana sayana Leach

Presenta un caparazón de hasta 1.8 cm; color marrón con brazos en forma de garra y patas para caminar con un patrón prominente de manchas blancas a azules delineadas en rojo; puede ser de vida libre, aunque comúnmente se asocia con otros crustáceos, moluscos y equinodermos. Habita en profundidades de hasta 16 m. Se presenta ocasionalmente en Florida Bahamas y el Caribe.

Familia: Epialtidae

Pelia mutica Gibbes

Caparazón triangular de hasta 1.8 cm; de color rojo típicamente decorado con trozos de esponja roja; brazos en forma de garra de color azul violáceo con motas negras;

habita en arrecifes hasta profundidades de 40 m y es común en florida Bahamas y el caribe.

Familia: Calappidae

Calappa flammea Herbst

Presenta un caparazón ovalado de hasta 10 cm; color crema en forma de cúpula con líneas onduladas de color marrón rojizo a la banda que forman un patrón de red que se vuelve más abierto hacia la parte posterior; habita en zonas arenosas hasta profundidades de 25 m. Ocasionalmente presente en Florida, Bahamas y Caribe al igual que en el Golfo de México.

Familia: Mithracidae

Mithraculus forceps A. Milne-Edwards

Caparazón ovalado de hasta 8 cm, brillante con tres surcos delanteros; coloración naranja, marrón, rojo a oliva. Las patas para caminar con cerdas; brazos de las pinzas en forma de garra robustos con dos espinas que apuntan hacia adelante en el interior de la primera sección.

Común Bahamas, sur de Florida y el Caribe.

Familia: Ocypodidae

Leptuca pugilator Bosc

Caparazón en forma cuadrada de hasta 25 mm de ancho, estrechándose ligeramente hacia atrás. Espacio entre ojos más corto que el pedúnculo ocular.

Machos con una chela extremadamente agrandada; la chela puede ser mucho más grande que el cuerpo de hasta 35 mm de largo.

Familia Diogenidae

Petrochirus diogenes Linnaeus

Organismos de hasta 20 cm, se considera el cangrejo ermitaño más grande del Caribe. Garras de color rojizo a marrón rojizo de tamaño casi igual (la izquierda es un poco más grande), la textura se asemeja a escamas superpuestas; antenas con bandas rojas y blancas.

Presente ocasionalmente en Florida Bahamas y el Caribe.

Paguristes cadenati Forest

Organismos de hasta 2 cm; con patas de color rojo brillante; caparazón y brazos con garras con hendiduras poco profundas; puede presentar algunas manchas blancas; ojos de color verdoso sobre pedúnculos pálidos.

Común en el sur de Florida, Bahamas y el Caribe

Familia: Grapsidae

Familia de cangrejos conocidos por estar pantanos rocas estuarios y a lo largo de las costas, se considera que al menos 10 géneros pertenecen a esta Familia.

Clase: Maxillopoda

Orden: Pedunculata

Familia: Lepadidae

Lepas (Lepas) anserifera Linnaeus

Presenta un tamaño de hasta 4 cm con cinco placas de concha traslúcidas; color azul blanquecino con ranuras radiales y bordes naranjas; presenta un tallo corto de color naranja que no mide más de una pulgada de largo; se fija con frecuencia a madera flotante, boyas y fondos de barcos hasta 40 m de profundidad y es común en florida Bahamas y Caribe.

Phylum: Echinodermata

Clase: Crinoidea

Orden: Comatulida

Familia: Comatulidae

Davidaster rubiginosus Pourtalès

De 20 a 40 brazos de hasta 37 cm de largo; los brazos y ramas lateralmente de color dorado y ocasionalmente amarillo café o negros; presenta ramas laterales ocasionalmente negras o negras con puntas anaranjadas; habitan en arrecifes de coral con una corriente suave hasta profundidades de 100 m Común a ocasional en el este del Caribe y raro en el resto del Caribe, sur de Florida y Bahamas.

Clase: Asteroidea

Orden: Valvatida

Familia: Ophidiasteridae

Linckia guildingi Gray

Presenta de cuatro a siete brazos tubulares delgados con puntas redondeadas y un tamaño de alrededor de 20 cm; los brazos presentan a menudo longitudes desiguales; presentan un color uniforme que va de rojizo a marrón amarillento, café o violeta; las superficies cubiertas de pequeñas placas hinchadas, con gránulos lisos; es común a ocasional en las Bahamas Florida Caribe y el Caribe circumtropical.

Familia: Oreasteridea

Oreaster reticulatus Linnaeus

Presenta cinco brazos cortos robustos cónicos que se extienden desde el cuerpo llegando a alcanzar hasta 50 cm; presenta espinas nudosas que forman diseños geométricos; típicamente de color café a marrón anaranjado con espinas de amarillo a marrón oscuro y líneas ocasionales; algunos individuos son de color gris; presentes en arenas y pastos marinos hasta 40 m de profundidad. En estancia juvenil los cuerpos son más planos y los colores y diseños son variables de amarillo, blanco y gris. Son comunes a ocasionales en Florida Bahamas y el Caribe.

Clase: Ophiuroidea

Orden: Ophiacanthida

Familia: Ophiocomidae

Breviturma paucigranulata Devaney

Presenta brazos de hasta 15 cm; de color marrón con numerosas espinas largas y puntiagudas. Amplia franja central pálida en los brazos que se extienden hasta el disco.

Poco común en el sur de florida, Bahamas y noreste

Ophiocoma echinata Lamarck

Presenta brazos de hasta 15 cm; espinas de los brazos largas; disco de color café gris o marrón con gránulos diminutos; ocasionalmente forma un patrón como pétalos de color blanco a tostado; brazos con algunas bandas; presenten arrecifes y escombros hasta 24 m de profundidad; su distribución es de Bermudas, Caribe, hasta Barbados.

Orden: Ophiacanthida

Familia: Ophiodermatidae

Ophioderma brevicaudum Lütken

Tamaño de los brazos de hasta 7.5 cm; disco pentagonal granulado y brazos cortos; el disco generalmente es color verde con manchas de rojo a marrón; brazos típicamente con bandas verdes, grises y blancas; generalmente se ubican arrecifes, rocas y pastos marinos a menos de 20 m de profundidad. Su distribución este es de Bermudas, el Caribe hasta Venezuela.

Familia: Ophiodermatidae

Ophioderma appressum Say

Brazos de hasta 13 cm de largo; color verde a gris; presentan bandas claras y oscuras; disco cubierto de pequeños gránulos redondeados y algunas motas oscuras o blancas, ocasionalmente patrones irregulares llamativos.

Común en Florida Bahamas y Caribe

Orden: Amphilepidida

Familia: Ophiotrichidae

***Ophiothrix (Ophiothrix) angulata* Say**

Presenta brazos de hasta 13 cm, con un disco pequeño; con lóbulos redondeados prominentes; los discos y brazos pueden ser del mismo color o de diferentes colores, incluido el rosa, rojo, naranja, verde, azul, gris o marrón; presenta numerosas espinas largas en el brazo delgado generalmente con una franja central, un patrón de encaje y algunas bandas. Distribución desde Bermudas, Caribe, hasta Uruguay.

***Ophiothrix oerstedii* Lütken**

Presenta brazos con delgadas bandas blancas y negras separadas por bandas de colores más anchas y padres de manchas amarillas adyacentes; de tamaño de alrededor de 6.5 cm; numerosas espinas largas.

Abundante en el sur de Florida Bahamas y Caribe

Familia: Ophionereididae

***Ophionereis reticulata* Say**

Presenta brazos de hasta 25 cm de largo; color verde claro a tostado; el disco es pentagonal con líneas reticuladas oscuras delgadas; brazos largos con bandas oscuras.

Es común en Florida, Bahamas y Caribe

Clase: Echinoidea

Orden: Cidaroida

Familia: Cidariidae

Eucidaris tribuloides Lamarck

Cuerpo de hasta 5 cm con espinas gruesas de color blanco rojizo con bandas de color marrón rojizo a menudo incrustadas; espinas secundarias cortas y blancas; se presenta en zonas de arrecifes pastos marinos de hasta 45 m. Su distribución es desde Carolina del norte, Caribe, hasta Brasil.

Orden: Diadematoida

Familia: Diadematidae

Diadema antillarum Philippi

Presenta espinas largas de hasta 20 cm delgadas y extremadamente afiladas; espinas de color negro ocasionalmente blancas; los juveniles presentan espinas blancas con bandas negras; forman concentraciones regularmente a lo largo de la costa rocosa; las espinas son quebradizas parecidas a agujas y perforan fácilmente la piel y se desprenden; se distribuyen en arenas pastos marinos y arrecifes de hasta 48 m. Abundante ocasional en el sur de Florida Bahamas y el Caribe.

Orden: Echinoida

Familia: Echinoimetricidae

Echinometra lucunter Linnaeus

Cuerpo de hasta 7 cm con espinas cortas y gruesas de color negro, oliva, café, rojo y naranja rojizo; tiende a perforar agujeros en el sustrato donde permanece durante el día; es común en zonas de mareas rocosas, pero se puede encontrar hasta 45 m. de profundidad; presenta una distribución desde Carolina del norte y Bermudas, Caribe y Brasil.

Echinometra viridis A. Agassiz

Cuerpo de hasta 5 cm con espinas gruesas y puntiagudas; las puntas de color violeta a marrón oscuro y un anillo blanco alrededor de la base; cuerpo de rojo a granate; presente mayormente en arrecifes poco profundos, pero llega hasta 40 m de profundidad. Su distribución desde el sur de Florida, Caribe hasta Venezuela.

Orden: Camarodonta.

Familia: Toxopneustidae

Lytechinus variegatus Lamarck

Cuerpo de hasta 10 cm de diámetro; cubierta densa de espinas cortas dispuestas en filas o racimos; cuerpo color blanco; espinas blancas, rojas, verdes, azules o lavanda.

Común en Florida Bahamas y Caribe

Tripneustes ventricosus Lamarck

Cuerpo de hasta 13 cm; color marrón rojizo ocasionalmente blanco con una densa cubierta de espinas cortas blancas; en ocasiones las espinas se separan en grupos a lo largo de las articulaciones de las placas del cuerpo; presenta en pastos marinos arenas y arrecifes poco profundos de hasta 10 m con lo cual a menudo cubierto con hojas de pastos. Su distribución es desde florida el caribe hasta el sur de Brasil, al igual que en el occidente de África.

Orden: Spatangoida

Familia: Brissidae

Meoma ventricosa Lamarck

Cuerpo de hasta 15 cm de diámetro en forma de cúpula con diseño de pétalos pentagonales dentados en la parte posterior; densamente cubierto con espinas cortas de color marrón.

Común en Florida Bahamas y el Caribe

Orden: Echinolampadacea

Familia: Mellitidae

Mellita quinquiesperforata Leske

Disco de color marrón amarillento a marrón o gris con cinco agujeros ovalados de hasta 15 cm de diámetro; diseño de pétalos pentagonal en el dorso; cubierta densa de espinas diminutas.

Ocasionalmente en Florida, Caribe y Golfo de México.

Clase: Holothuroidea

Orden: Holothuriida

Familia: Holothuriidae

Actinopyga agassizii Selenka

Organismo de hasta 25 cm de largo de color marrón amarillento moteado a marrón o crema con suela blanquecina; podios pequeños y nudosos en el dorso; los que se encuentran a lo largo de la suela son grandes y cónicos; costados ligeramente aplanados; cuerpo ocasionalmente arrugado.

Presente ocasionalmente en Florida, Bahamas y el Caribe

Holothuria (Halodeima) mexicana Ludwig

Tamaño de hasta 36 cm; color gris oscuro a negro con pliegues profundos; son una ventral blanca con podios marrones dispersos. Presente en pastos marinos, arenas y arrecifes de hasta 37 m de profundidad. Distribución desde Florida, Bahamas el Caribe hasta Venezuela.

Holothuria (Theelothuria) princeps Selenka

Tamaños de hasta 30 cm; color marrón moteado, café y blanco; cuerpo pausado, más hacia atrás que hacia la boca; presenta verrugas de diferentes tamaños con papilas diminutas en las puntas; manchas de color marrón a negros en el dorso; presente en arenas hasta 228 m de profundidad. Distribución Florida, Bahamas hasta Venezuela.

Análisis estadísticos

Índice de riqueza específica

Los resultados de la riqueza específica de especies mostraron un total de 57 taxa de macroalgas, tres de pastos marinos y 81 especies de invertebrados. En 2018 se identificaron 21 especies de macroalgas, tres de pastos marinos y 71 especies de invertebrados marinos bentónicos; en 2022 se determinaron 39 especies de macroalgas, tres de pastos marinos y 72 especies de invertebrados marinos bentónicos; y en 2023 se obtuvo un resultado de 40 especies de macroalgas, dos especies de pastos marinos y 75 de invertebrados marinos bentónicos (Tabla 12).

Tabla 12. Riqueza específica de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en la zona noroeste de la isla de Cozumel

Riqueza específica				
	2018	2022	2023	Total
Macroalgas	21	39	40	57
Pastos Marinos	3	3	2	3
Invertebrados	71	72	75	88

El índice de Similitud de Jaccard para las macroalgas mostró una baja similitud entre los años 2018 con 2022 con un valor de 0.2765 al igual que entre los años 2018 y

2023 con un valor de 0.2708. La similitud entre 2022 y 2023 obtuvo un valor de 0.5192, valor considerado como medio.

Respecto a los pastos marinos entre 2018 y 2022 el valor fue de 1, mientras que entre 2018 y 2023 y entre 2022 y 2023 el valor fue de 0.6666.

Por último, respecto a los invertebrados un valor de 0.8101 entre los años 2018 y 2022, entre los años 2018 y 2023 el valor fue de 0.7804, mientras que, para 2022 y 2023 el valor fue de 0.8375. Los tres valores presentaron un valor de similitud alto en comparación con las macroalgas.

Tabla 13. Diversidad beta a partir del índice de similitud de Jaccard de macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel

	Índice de similitud de Jaccard		
	2018-2022	2018-2023	2022-2023
Macroalgas	0.27659574	0.27083333	0.51923077
Pastos Marinos	1	0.66666667	0.66666667
Invertebrados	0.81012658	0.7804878	0.8375

De la misma forma, se determinó el índice de similitud de Jaccard para conocer si existía similitud entre las zonas arenosas, rocosas y charcos de marea. Las macroalgas mostraron un valor de 0.3870 entre las zonas arenosas y rocosas, el valor entre la zona arenosa y charcos de marea fue de 0.2 y entre la zona rocosa y charcos de marea fue de 0.2777.

Tabla 14. Riqueza específica de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en los diferentes tipos de playa de la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Riqueza específica de sustratos			
	Arena	Roca/mixta	Charcos de Marea
Macroalgas	53	33	13
Pastos Marinos	3	3	0
Invertebrados	18	60	31
General	74	96	44

Igualmente, Los pastos marinos mostraron un valor entre zonas arenosas y rocosas de 0.5, mientras que, tanto entre zona arenosa con charcos de marea y zona rocosa y charcos de marea fue de cero.

De igual importancia, para los invertebrados marinos se obtuvo un resultado entre la zona arenosa y rocosa de 0.21, entre zona arenosa y rocosa fue de 0.0888 y entre la zona rocosa y charcos de marea fue de 0.1818.

Finalmente, el valor general de los organismos entre la zona arenosa y rocosa fue de 0.3076, en segundo lugar, entre la zona rocosa y zona charcos de marea fue de 0.2068 y entre zona arenosa y charcos de marea fue de 0.2068.

Tabla 15. Diversidad beta a partir del índice de similitud de Jaccard a partir de playas arenosas rocosas y charcos de marea de las macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de la isla de Cozumel

Índice de similitud de Jaccard entre tipos de playas			
	Arena-Roca/mixta	Arena-C. Marea	Roca/mixta-C. Marea
Macroalgas	0.38709677	0.2	0.27777778
Pastos Marinos	0.5	0	0
Invertebrados	0.21875	0.08888889	0.18181818
General	0.30769231	0.1456311	0.2068966

En cuanto a la distribución por tipo de playa, las macroalgas mostraron su mayor presencia en las zonas arenosas, donde se registraron 53 especies, seguidas por las zonas rocosas con 33 especies, finalmente, los charcos de marea con 13 especies. Los pastos marinos estuvieron presentes tanto en playas arenosas como rocosas, representados por las tres especies identificadas en el estudio. Por su parte, los invertebrados marinos alcanzaron su mayor riqueza en las zonas rocosas con 60 especies, seguidos por los charcos de marea con 31 especies, mientras que en las playas arenosas solo se observaron 18 taxa (Figura 31).

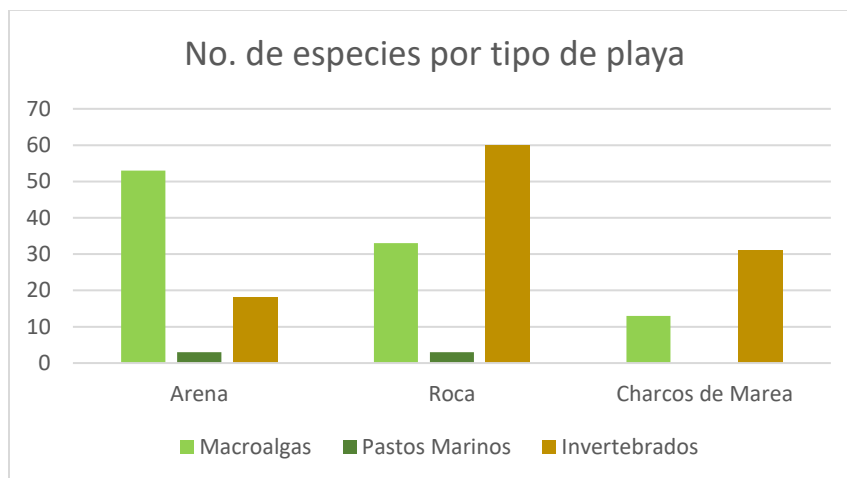


Figura 31. Número de especies de macroalgas, pastos marinos e invertebrados marinos registrados por el tipo de playa en la zona noroeste de la isla de Cozumel.

Similitud.

El análisis de similitud (ANOSIM) mostró una ligera diferencia en la composición de macroalgas y pastos entre estaciones ($R = 0.2188$; $p = 0.0183$). Para los invertebrados se observó una marcada diferenciación entre estaciones ($R = 0.8261$; $p = 0.001$) y el análisis conjunto de macroalgas, pastos marinos e invertebrados también evidenció diferencias entre estaciones ($R = 0.8222$; $p = 0.0001$). En consonancia, el análisis de conglomerados que integra los tres grupos (Figura 32) identificó cuatro agrupaciones con $>60\%$ de similitud: E2A2–E3A3 (65%); E3B2–E3B3–E4A3 (68%); E6A1–E6A2 (68%); y E6B2–E6B3 (73%). Las agrupaciones más consistentes se reforzaron a través del tiempo. Destacaron E6A1–E6A2 y E6B1–E6B2, dado que E6A registró la segunda mayor riqueza de macroalgas y que E6A/E6B presentaron la mayor riqueza de invertebrados.

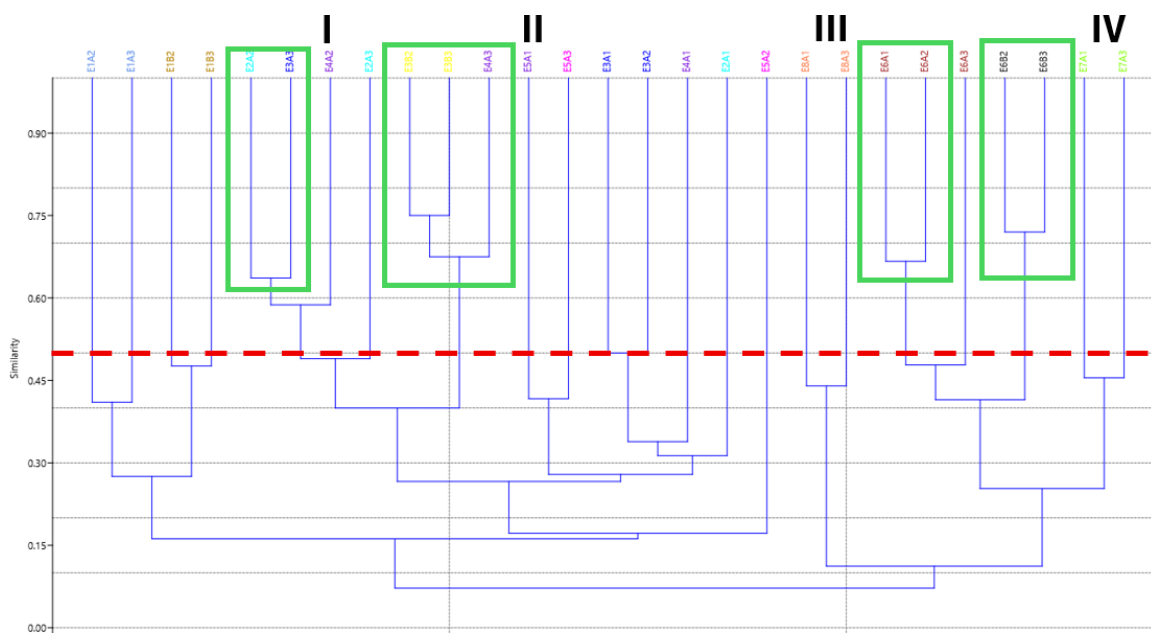


Figura 32. Análisis de conglomerados sobre la similitud de macroalgas, pastos marinos e invertebrados entre estaciones y años de colecta. E1A, E1B, E2A, E3A, E3B, E4A, E5A, E6A, E6B, E7A, E8A. 1) 2018, 2) 2022, 3) 2023.

De igual importancia, el Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) (integrando macroalgas pastos marinos e invertebrados) mostró la generación de cuatro grupos, el primero conformado por las estaciones E1A y E1B (años 2022 y 2023); el segundo grupo se conformó por las estaciones E2A, E3A, E3B, E4A y E5A (la estación E3B para los años 2022 y 2023); el tercer grupo fue integrado por las estaciones E6A, E6B (2022 y 2023) y E7A (2018 y 2023); y el cuarto agrupamiento incluyó las estaciones E8A (2018 y 2023) (Figura 33). Los agrupamientos fueron los mismos respecto a la asociación de variables fisicoquímicas como sedimentarias donde se obtuvo un nivel de STRESS de 0.1516 y 0.1530 respectivamente. Se

considera un buen ajuste del modelo y biológicamente interpretable según los lineamientos planteados por Kruskal.

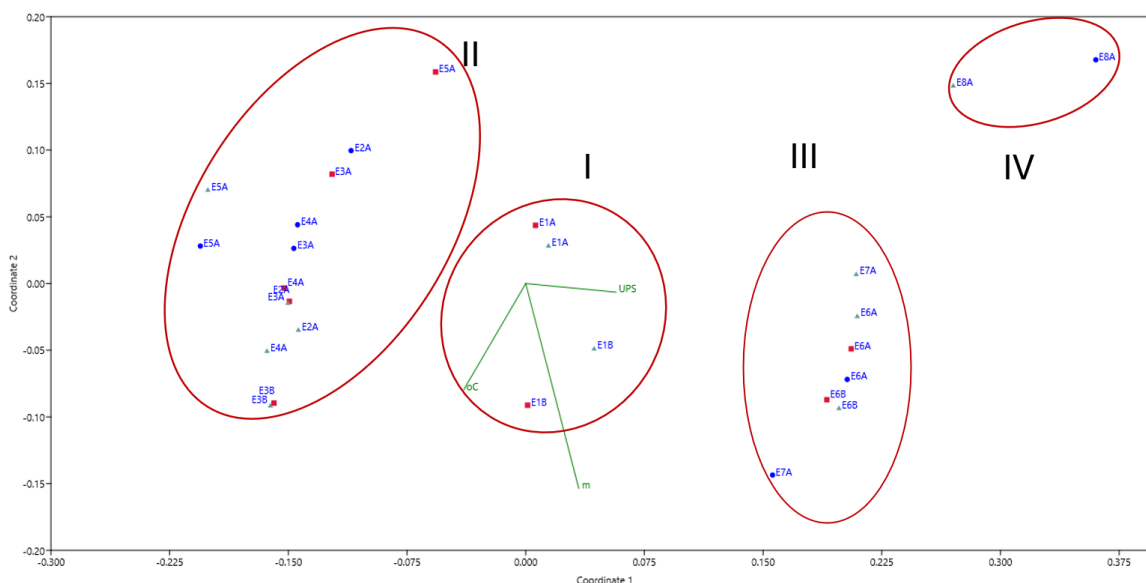


Figura 33. Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables fisicoquímicas de agua (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triángulo verde corresponde a 2023)

Las especies de macroalgas Chlorophyta (CL), Rhodophyta (RP) y Ochrophyta (OP) mostraron una tendencia hacia el grupo I y II al igual que el grupo de los pastos marinos (MP). Por otra parte, las especies de invertebrados marinos de los Phyla Porifera (Po), Cnidaria (Cn) Anellida (An) Mollusca (Mo) Arthropoda con los subphyla Crustacea (Cr) y Echinodermata (Ec) expresaron una mayor afinidad hacia los grupos III y IV (Figura 34).

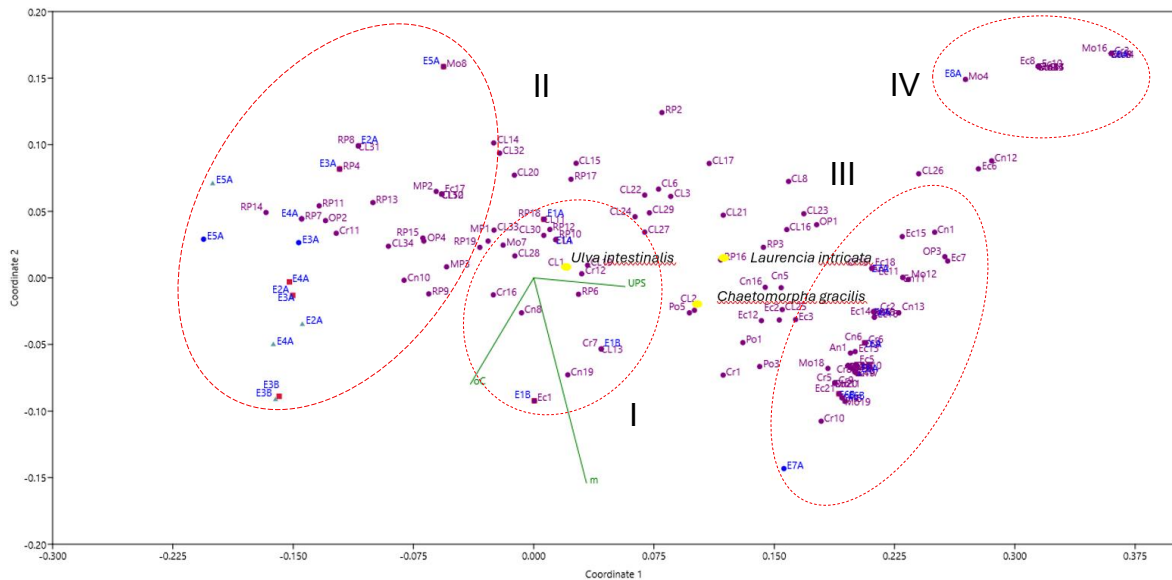


Figura 34. Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables fisicoquímicas de agua y la presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triángulo verde corresponde a 2023).

Se presentó cierta tendencia de tres algas bioindicadoras (*Ulva intestinalis*, *Chaetomorpha gracilis* y *Laurencia intricata*) relacionadas con la salinidad, mientras que *Hypnea spinella* mostró mayor afinidad al CO y *Ulva intestinalis* ligeramente a los carbonatos (Figura 35).

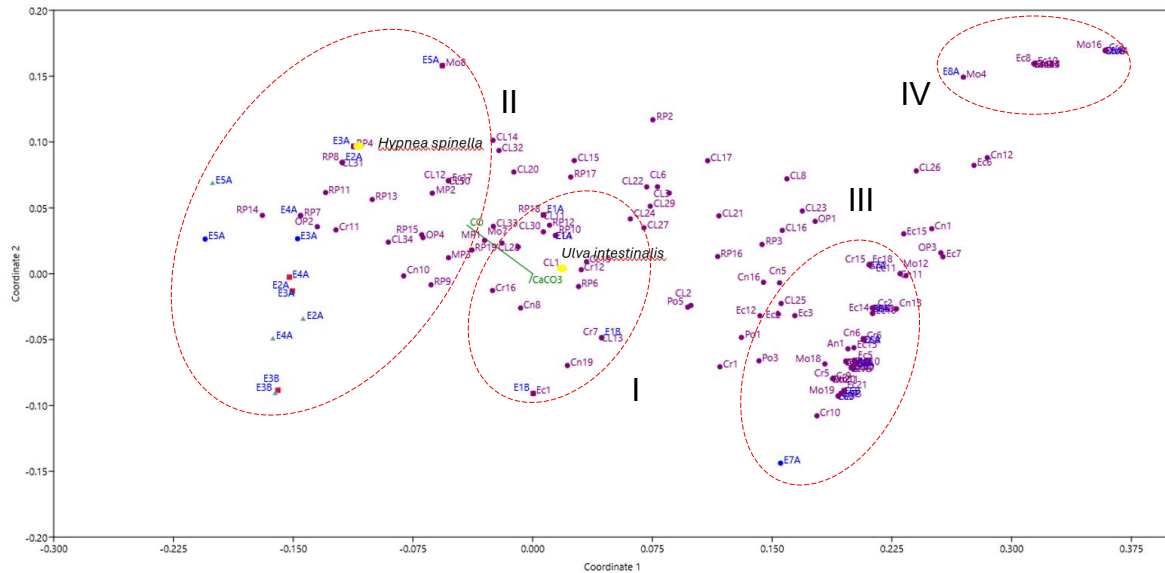


Figura 35. Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) indicando las similitudes entre las estaciones de colecta y su relación con variables sedimentarias y presencia de macroalgas, pastos marinos e invertebrados (círculo azul corresponde a las estaciones 2018; cuadrado rojo corresponde a 2022; triángulo verde corresponde a 2023).

La distribución de los organismos corresponde a lo visto en campo, donde la mayoría de las especies de macroalgas y pastos marinos se distribuyeron principalmente entre las estaciones E1A a E5A, las cuales presentan un tipo de sedimento similar (playas arenosas). Los invertebrados se distribuyeron en mayor cantidad entre las estaciones E6A a E8A, al igual que las macroalgas, estas estaciones presentan un tipo de sedimento similar (playas mixtas y charcos de marea). El análisis de ji-cuadrada mostró que los tipos de playa si influían en la distribución de los organismos ($P < 0.05$) donde las macroalgas tuvieron una mayor

distribución en las playas arenosas seguidas de las playas rocosas y los invertebrados marinos en las playas rocosas seguidas de los charcos de marea.

Grupos tróficos

Se clasificaron los invertebrados marinos de acuerdo con sus hábitos alimentarios en seis categorías: filtradores de partículas suspendidas, planctívoros, herbívoros, detritívoros, carnívoros y omnívoros. Posteriormente, se aplicó un análisis de conglomerados para identificar qué grupos compartían el mayor número de especies. Asimismo, se realizó un análisis de componentes principales con el propósito de evaluar la distribución de las especies según sus hábitos tróficos.

El análisis de conglomerados evidenció un agrupamiento entre los hábitos filtrador de partículas suspendidas y planctívoros, con una similitud superior al 75% (Figura 36). Por su parte, el análisis de componentes principales (PCA) mostró que los dos primeros componentes explicaron el 94.76% de la variabilidad total (componente 1: 82.93%; componente 2: 11.83%).

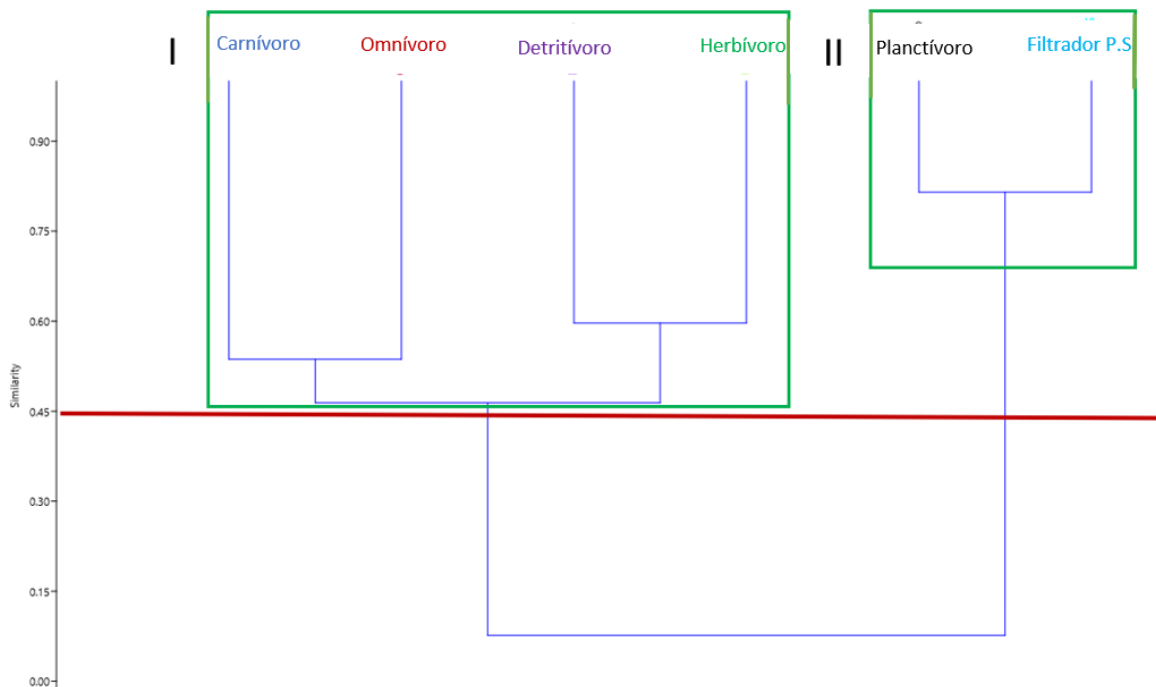


Figura 36. Análisis de conglomerados para determinar la similitud de las especies por hábitos alimentarios.

Las estaciones comprendidas entre E1A y E5A, en los tres muestreos (2018, 2022 y 2023), no presentaron una asociación clara con los hábitos alimentarios evaluados. En contraste, las estaciones E8A (2022 y 2023) se relacionaron principalmente con organismos detritívoros y herbívoros, mientras que las estaciones E6B (2022 y 2023) y E7A (2023) se vincularon con organismos filtradores y planctívoros. Finalmente, las estaciones E6A (2018, 2022 y 2023) y E7A (2018) mostraron afinidad con prácticamente todos los hábitos alimentarios registrados en este estudio (Figura 37).

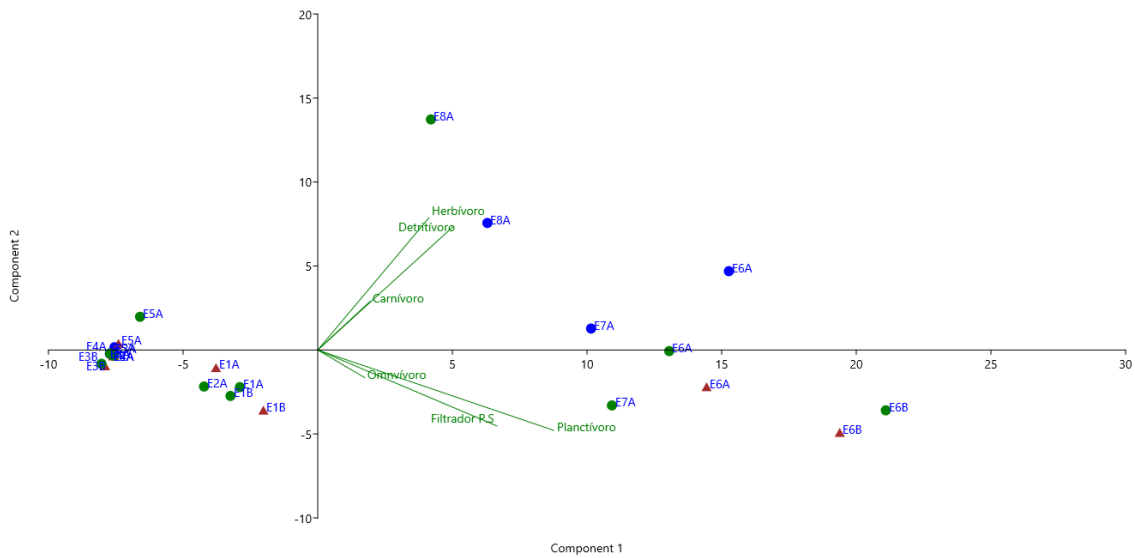


Figura 37. Análisis de componente principales (ACP) sobre la relación entre las estaciones y los hábitos alimentarios de los invertebrados marinos (puntos azules: 2018; triángulos rojos: 2022; círculos verdes: 2023).

DISCUSIÓN

Variables ambientales del agua

La profundidad en la zona costera es un factor físico determinante, ya que condiciona múltiples características del ecosistema. En general, las playas presentan una morfología variable a lo largo de la costa: la pendiente suele ser más pronunciada cerca de la línea de costa y se suaviza progresivamente hacia mar abierto (Bernabéu *et al.*, 2001). En la región noroeste de Cozumel, esta transición se manifiesta en una pendiente amplia y de baja inclinación (Quijada & Zamorano-Orozco, 2024).

Las variaciones en la profundidad influyen directamente en la distribución de los organismos, muchos de los cuales dependen de rangos específicos para su supervivencia. Asimismo, determinan la cantidad y calidad de luz que penetra en la columna de agua, afectando la fotosíntesis de macroalgas y pastos marinos. La profundidad también modula la temperatura del agua, un parámetro clave en la distribución y el comportamiento de numerosas especies. En conjunto, estos factores físicos contribuyen a moldear la estructura y composición biológica de los ecosistemas costeros (Duarte & Cebrián, 1996; Harley *et al.*, 2006).

En este estudio, la profundidad de muestreo estuvo determinada por el perfil de playa y las condiciones del oleaje en cada punto. Aunque el PNAC reporta profundidades que oscilan entre 7 y ~400 m (Loreto-Viruel *et al.*, 2017), este rango no se observó en la zona noroeste. La estación E8A presentó la menor profundidad debido a su ubicación dentro de un área de pozas de marea. En contraste, las estaciones E1B, E3B y E6B registraron las mayores profundidades entre 2 y 6 m, asociadas a su localización mar adentro, a distancias de 80 a 200 m de la costa. El resto de las estaciones no superó los cuatro metros.

Asimismo, la profundidad, no expuso diferencias significativas entre estaciones ni entre los años de muestreo. Con base en lo anterior, la diferencia de profundidad entre las pozas de marea y las demás estaciones se explica por su naturaleza intermareal, mientras que las demás se encuentran permanentemente sumergidas en la zona infralitoral. La principal razón de las profundidades de la zona noroeste de Cozumel se atribuye a que la plataforma se extiende de manera más amplia y con menor pendiente en esta zona en comparación con la del PNAC (Quijada-

Mendoza & Zamorano-Orozco, 2024) Igualmente, la zona está sujeta a la influencia de la estacionalidad y de eventos meteorológicos extremos, como huracanes y marejadas, que pueden modificar directamente los fondos marinos costeros (Miranda & Valdivieso, 2000; González & Ramírez, 2018).

La temperatura de la zona costera es un determinante crucial de procesos fisicoquímicos y biológicos, influenciando la tasa de fotosíntesis en macroalgas y por ende su producción primaria, la distribución y diversidad de especies marinas, y el cumplimiento de los ciclos de vida (Pörtner & Farrell *et al.*, 2004; Wernberg *et al.*, 2012).

En este estudio, la temperatura promedio del agua fue de 29.1 °C, con un rango entre 27.0 °C y 33.9 °C. Se registraron diferencias significativas entre 2018 y 2023, superiores a 2 °C, lo cual sugiere una marcada variación temporal (Tabla 2). Este comportamiento podría estar asociado a fenómenos atmosféricos; por ejemplo, el huracán *Michael* (categoría 1), que pasó cerca de Cozumel previo al muestreo de octubre de 2018, probablemente contribuyó al descenso de la temperatura en ese periodo (Webb, 2019). La estacionalidad también desempeña un papel importante: los muestreos de julio corresponden al verano, cuando la mayor radiación solar incrementa la temperatura; en contraste, octubre y noviembre representan la transición hacia el invierno, con menor radiación incidente (Hernández y Rodríguez, 2020). Estas temperaturas de 2023 pueden relacionarse con la alta incidencia de luz, con temperaturas atmosféricas superiores a 35 °C reportadas para ese periodo (Weather-Spark, 2025). Además, Birkart y Álvarez-Filip (2025) documentan que 2023 presentó temperaturas récord en el Caribe mexicano, asociadas a una ola de

calor y a la escasa corriente en la zona (~ 0.1 m/s; Callejas-Jiménez *et al.*, 2021), sumado a la baja profundidad de las estaciones. Aunque no se observaron diferencias significativas entre estaciones, en 2023 se registraron valores elevados de 32°C y 33.9°C en las estaciones E3A y E3B, respectivamente. La influencia de la profundidad es particularmente relevante: existe una relación inversa entre temperatura y profundidad, de modo que en aguas someras la radiación solar penetra con mayor intensidad y el menor volumen de agua favorece el calentamiento superficial (Zika *et al.*, 2015). Asimismo, la corriente cálida ecuatorial que atraviesa el canal de Yucatán contribuye a mantener temperaturas elevadas en la región, como lo reportan Alcérreca-Huerta *et al.* (2019b) para Cozumel, con valores promedio cercanos a 29.25°C (Harley *et al.*, 2006; Athié *et al.*, 2011). Finalmente, los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos previamente reportados para el Caribe mexicano, tal como se muestra en la Tabla 16 (Torres & Calva, 2012; Calva-Benítez *et al.*, 2014; Chávez *et al.*, 2014; Aguilar-Trujillo *et al.*, 2014; Hendy *et al.*, 2021). No obstante, se ubican ligeramente por encima del promedio de 27.5°C documentado por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991).

Tabla 16. Tabla comparativa de temperaturas en sistemas costeros del Caribe.

Lugar	Promedio °C	Referencia
Costa Maya	30.56	Calva- Benítez <i>et al.</i> , 2014
Mahahual, Q. Roo	29.6	Torres & Calva, 2012
Yal Ku	29.5	Hendy <i>et al.</i> 2021
Chacopata, Sucre, Venezuela	25.6	Lara-Rodríguez <i>et al.</i> , 2015
Cispatá, Colombia	27	Niño-Miranda <i>et al.</i> , 2020
Caribe mexicano	27.02	Chávez <i>et al.</i> 2014
Puerto Morelos, Q. Roo	35	Birkart & Álvares-Filip, 2025
Cozumel	27.5	Mateo-Cid & Mendoza- González, 1991
Cozumel	29.5	Alcérreca-Huerta <i>et al.</i> , 2019b
Zona noroeste de Cozumel	29.1	Este trabajo

La salinidad desempeña un papel determinante en los ecosistemas marinos, ya que influye en la composición y distribución de la diversidad costera, considerando que numerosos organismos son esteno o eurihalinos (Liu, 2016). En la presente investigación se registró un valor promedio de 34.61 UPS (32.4 – 38 UPS), sin diferencias significativas entre los años (Tabla 2). No obstante, el muestreo de 2018 alcanzó los valores más elevados, con un promedio de 35.09 UPS. Este resultado podría estar vinculado con la menor precipitación registrada en octubre (142 mm) y

noviembre de 2018 (85 mm), en comparación con los muestreos de 2022 (95 mm) y 2023 (94 mm) (Weather-Spark, 2025).

Se ha señalado que las variables de profundidad y temperatura se relacionan con la salinidad, particularmente cuando el incremento de la temperatura favorece la evaporación. En este estudio, aunque no se detectaron diferencias significativas de salinidad entre muestreos ni entre estaciones, se observó un valor más alto en la estación E8A, donde se localizan las pozas de marea. Este patrón se asoció con una mayor evaporación durante la marea baja, favorecida por la radiación solar (Dawes, 1998; Liu *et al.*, 2016; Hernández & Muñoz, 2019).

La salinidad determinada en este trabajo resultó consistente con lo reportado por el INECOL (1998) para la isla de Cozumel. En contraste, Alcérreca-Huerta *et al.* (2019a) documentaron valores superiores, atribuidos a las propiedades cálidas y salinas de la corriente de Yucatán. Otros estudios en el Caribe han señalado salinidades semejantes, como los realizados por Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2012), Hernández-Terrones *et al.* (2011), Hendy *et al.* (2021) y Chávez *et al.* (2014) (Tabla 17).

Tabla 17. Tabla comparativa de salinidad en sistemas costeros del Caribe.

Lugar	Promedio UPS	Referencia
Puerto Morelos	30.56	Hernández-Terrones <i>et al.</i> 2011
Mahahual, Q. Roo	33.9	Torres & Calva, 2012
Yal Ku	34	Hendy <i>et al.</i> 2021
Santa marta, Colombia	36.1	García <i>et al.</i> , 2012
Chacopata, Sacre, Venezuela	38	Lara-Rodríguez <i>et al.</i> , 2015
Caribe mexicano	32.8	Chávez <i>et al.</i> 2014
Cozumel	34.5	INECOL, 1998
Cozumel	37.03	Alcérreca-Huerta <i>et al.</i> 2019
Zona noroeste de Cozumel	34.61	Este trabajo

El oxígeno disuelto es un parámetro fundamental para evaluar la salud de los ecosistemas costeros, ya que resulta esencial para la respiración de organismos acuáticos, incluidos microorganismos, invertebrados y peces. Su disponibilidad influye directamente en la estructura y estabilidad de las comunidades biológicas (Díaz & Rosenberg, 2008). La descomposición de materia orgánica en los sedimentos puede reducir notablemente sus concentraciones, pues este proceso

consume oxígeno y puede generar condiciones en las que la demanda supera el suministro (Rabalais *et al.*, 2002).

En Cozumel, el oxígeno disuelto es producido principalmente por fitoplancton, macroalgas y pastos marinos (Rioja-Nieto *et al.*, 2012; Estrada-Saldívar *et al.*, 2021). En el presente estudio se registró una concentración media de 6.23 mg/L durante 2018. Este valor puede atribuirse a las bajas profundidades del área de muestreo, las cuales se encuentran dentro de la zona fótica y permiten una alta actividad fotosintética de los productores primarios, aun cuando la temperatura y la salinidad reducen la solubilidad del oxígeno (Weiss, 1970).

De acuerdo con la CONAGUA (2021), la concentración mínima recomendada para la protección de la vida acuática es de 5.0 mg/L, por lo que los valores obtenidos en este estudio son adecuados para sostener las comunidades presentes en la zona noroeste de Cozumel. Investigaciones previas en sistemas costeros y arrecifales muestran rangos similares, como los reportados por Calva-Benítez *et al.* (2014), Chávez *et al.* (2014) y Hendy *et al.* (2021) (Tabla 18). En comparación, el valor promedio aquí registrado fue ligeramente menor que el de la mayoría de estos trabajos, con excepción del estudio de Chávez *et al.* (2014).

Tabla 18. Tabla comparativa de OD en sistemas costeros mexicanos

Lugar	Promedio (mg/L)	Referencia
Costa Maya	7.2	Calva <i>et al.</i> , 2014
Yal Ku	9	Hendy <i>et al.</i> 2021
Caribe mexicano	5.64	Chávez <i>et al.</i> 2014
Chacopata, Sucre, Venezuela	5.89	Lara-Rodríguez <i>et al.</i> , 2015
Zona noroeste de Cozumel	6.23	Este trabajo

El pH es importante en los ecosistemas acuáticos debido a su influencia directa en los organismos marinos. Una de sus implicaciones más relevantes es la modificación en la disponibilidad de carbonatos en la columna de agua, compuestos indispensables para la calcificación de fitoplancton, macroalgas, corales y moluscos (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Asimismo, las variaciones en este parámetro están estrechamente vinculadas con la acidificación oceánica, un proceso asociado al cambio climático que genera impactos negativos en la biota marina (Doney *et al.*, 2009; Hofmann *et al.*, 2011).

En este estudio se registró un valor promedio de pH de 8.06, similar al reportado en otros sistemas costeros por Torres y Calva (2012), Hernández-Terrones *et al.* (2015) y Rojas-Higuera y Pabón-Caicedo (2015). No obstante, algunos autores como Calva-Benítez *et al.* (2014), Lara-Rodríguez *et al.* (2015) y Flores-Ramírez *et al.* (2021) han documentado valores superiores al obtenido en la presente investigación

(Tabla 19). Si bien no se observaron diferencias significativas entre estaciones de muestreo, sí se detectaron variaciones significativas entre años. En particular, 2022 presentó los valores más bajos en comparación con 2023. Este patrón podría relacionarse con el aumento de temperatura registrado entre ambos periodos, dado que el incremento de calor y radiación favorece un incremento en la salinidad y la fotosíntesis, proceso que consume CO₂ y eleva el pH al generar condiciones más alcalinas (León *et al.*, 2011). Adicionalmente, Cyronak *et al.* (2020) destacan que el pH suele disminuir con la profundidad, lo cual resulta congruente al tratarse de estaciones someras.

Tabla 19. Tabla comparativa de pH en sistemas costeros mexicanos

Lugar	Promedio	Referencia
Costa Maya	8.5	Calva-Benítez <i>et al.</i> 2014
Mahahual, Q. Roo.	8.3-8.6	Torres & Calva, 2012
Akumal	8	Hernández-Terrones <i>et al.</i> , 2015
Huatulco, Oaxaca	8.2-8.3	Flores-Ramírez <i>et al.</i> , 2021
Caribe Colombiano	8.1	Rojas-Higuera & Pabón -Caicedo, 2015
Chacopata, Sucre, Venezuela	8.3	Lara-Rodríguez, <i>et al.</i> , 2015
Zona noroeste de Cozumel	8.06	Este trabajo

Variables Sedimentarias

La textura de los sedimentos en los sistemas costeros está influenciada por diversos factores, como procesos fluviales, oceanográficos, biológicos y químicos. Entre

estos destacan el flujo marea y la descarga de ríos (Sanderson & Taylor, 2003). Por lo general, el tamaño de los sedimentos en las playas es mayor que en ambientes como lagunas costeras, principalmente debido a la influencia de las corrientes marinas (Calva-Benítez *et al.*, 2014).

Solo hubo diferencias significativas entre muestreos para la fracción gránulo, no obstante, el porcentaje de gránulo hallado fue menor del 3% de la composición total del sedimento. En el caso de arena media también presentó diferencias entre los muestreos, encontrándose el valor más alto en noviembre de 2018, esto se pudo atribuir al huracán categoría 1 “Michael” que pasó cerca de Cozumel en octubre de 2018, incrementado el oleaje y con ello el arrastre de sedimento más fino. En este estudio, se observó una mayor prevalencia de arena fina y arena muy fina durante los tres años de muestreo, especialmente en las estaciones E1A, E1B, E2A, E3A, E3B, E4A y E5A. Cabe destacar que un muelle separa estas estaciones de E6A, E6B, E7A y E8A, donde predominan arenas de tamaño medio a grueso. Además, se presentaron diferencias significativas entre el tipo de sedimento arena muy fina y arena media entre las estaciones de muestreo.

Por lo que, la textura de los sedimentos puede explicarse por una combinación de factores principales: la presencia del muelle y las corrientes del canal de Cozumel. Estas corrientes, que fluyen de sur a norte, tienden a inclinarse hacia la isla cuando su intensidad aumenta (Athié *et al.*, 2011). Callejas-Jiménez *et al.* (2021) señalan que, en la zona norte de la isla de Cozumel, (frente al área de estudio), la densidad de energía incrementa debido al estrechamiento de la plataforma insular. Esto genera que la corriente alcance velocidades de hasta 1 m/s en dirección norte,

aunque la energía disminuye gradualmente conforme avanza hacia el extremo norte, formando una franja que bordea la plataforma insular.

De igual importancia, la disposición de los sedimentos está influenciada por la energía hidrodinámica. Las partículas más grandes se depositan en áreas con mayor energía (como las estaciones E6A, E6B, E7A y E8A), mientras que las partículas más pequeñas se acumulan en zonas con menor energía. Este patrón está asociado con la ubicación del muelle, que interrumpe la continuidad de las corrientes, favoreciendo la sedimentación de partículas más finas en las estaciones E1A, E1B, E2A, E3A, E3B, E4A y E5A (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2017).



Figura 38. Muelle de la zona noroeste de la isla de Cozumel, correspondiente a la estación E6A y E6B.

Respecto al carbono orgánico (CO), se observó que los valores más elevados se registraron en áreas con sedimentos dominados por arena fina. Aunque no se identificaron diferencias significativas entre años ni entre estaciones, la estación E1A presentó las concentraciones más altas de CO. Este patrón podría estar relacionado con su proximidad a las lagunas costeras ubicadas al norte de la isla, así como con la presencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. En la Figura 1 se aprecia una ligera “pluma” de agua de tonalidad más oscura proveniente del noroeste, la cual abarca las estaciones de E1A a E4A, todas ellas caracterizadas por un predominio de arena fina. De acuerdo con Calva *et al.* (2014), existe una relación entre el tamaño de grano del sedimento y la acumulación de carbono orgánico, siendo las arenas finas más propensas a retener materia orgánica. Además, parte del CO registrado podría tener origen biogénico, dado que las macroalgas y pastos marinos constituyen una fuente importante de materia orgánica en los ecosistemas costeros (Pawlik *et al.*, 2018; Calva *et al.*, 2014).

Comparando estos valores con otros sistemas (Tabla 20), se observa que los resultados son similares, con otros valores reportados para sistemas costeros someros. De hecho, son parecidos a los reportados en Puerto Morelos (0.68%) y Mahahual (0.53%) (Torres-Alvarado & Calva-Benítez, 2012). Al contrario, los sistemas lagunares de La Mancha (3.93%) (Botello *et al.*, 2001) y Chantuto-Panzacola (3.95%) (Calva-Benítez *et al.*, 2006) muestran valores más elevados

debido a la naturaleza de sus sedimentos, que suelen ser limo-arcillosos y, por lo tanto, presentan mayores niveles de materia orgánica (Parejo, 2017).

Por otro lado, en Xcalak, (zona lagunar), se reportaron niveles altos de CO, atribuibles a la prevalencia de praderas de *Thalassia testudinum* en el área, según Calva *et al.* (2014). Lo que es equiparable a la zona que incluye de las estaciones E1A hasta la E5A por la presencia de pastos marinos.

Tabla 20. Tabla comparativa de carbono orgánico en sedimentos en sistemas costeros mexicanos

Lugar	% CO	Referencia
Xcalak Q.Roo (Zona costera)	2.75	Calva-Benítez <i>et al.</i> (2014)
Mahahual, Q.Roo (Zona costera)	0.53	Torres-Alvarado & Calva-Benítez (2012)
Puerto Morelos, Q.Roo (Zona costera)	0.68	Calva-Benítez & Torres-Alvarado (2011)
Zona noroeste de Cozumel	0.56	Este trabajo

Chantuto-Panzacola, Chis (laguna costera)	3.95	Calva-Benítez <i>et al.</i> (2006)
La Mancha, Ver (laguna costera)	3.93	Botello <i>et al.</i> (2001)

Los carbonatos son fundamentales para los procesos de calcificación en los organismos, ya que les permite construir y mantener sus esqueletos o conchas. Por ejemplo, los corales dependen críticamente de este compuesto para formar los grandes ecosistemas arrecifales. Además, los carbonatos desempeñan un papel importante en la regulación del pH de los océanos al contrarrestar la acidificación mediante su reacción con la acidez del agua (Gattuso *et al.*, 1999; Sabine *et al.*, 2004; Hughes *et al.*, 2017).

En la zona noroeste, los principales aportes de carbonatos provienen de fuentes biogénicas, como los invertebrados marinos y las macroalgas del Género *Halimeda* sp., que precipitan carbonatos. Estas fuentes son tanto locales como transportadas desde la zona sur de la isla, donde se concentra la mayor cantidad de arrecifes, a través de las corrientes marinas (Athié *et al.*, 2011; Castro-Sanguino *et al.*, 2020). Norzagaray-López *et al.* (2018) destacan que los arrecifes coralinos son grandes reservorios de carbonatos en el medio marino y que México alberga varios de estos ecosistemas, siendo Cozumel uno de ellos, al formar parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).

Al comparar los resultados de este estudio con los de Núñez (2011), se observaron valores ligeramente más bajos, lo cual podría deberse a una menor presencia de

arrecifes coralinos en el área estudiada. Por otro lado, Núñez-Ravelo *et al.* (2016) reportaron valores aún más bajos, atribuidos a que las muestras fueron tomadas en una zona de descarga de agua dulce. Esto refuerza la idea de que los carbonatos de origen biogénico representan una importante contribución a los sedimentos marinos.

Tabla 21. Concentración promedio de carbonatos en sedimentos de calcio en algunos sistemas costeros del Caribe.

Lugar	Carbonatos (%)	Referencia
Ensenada de Puerto Cruz (Venezuela)	12	Núñez <i>et al.</i> (2016)
Bahía de Mochima (Venezuela)	78.64	Núñez (2011)
Playa Santa pilar y Barracuda (Cozumel)	64.79	Este trabajo

Riqueza específica ficoflorística

La diversidad de especies identificadas en la zona norte de la isla de Cozumel fue de 141 especies, de las cuales 57 especies fueron macroalgas, tres especies de pastos marinos. Las macroalgas se dividieron en Divisiones Rhodophyta con 19 especies, Ochrophyta con cuatro especies y Chlorophyta con 34 especies. Los pastos marinos, perteneciendo a la División Tracheophyta solo presentaron tres especies. Los trabajos de diversidad que se han realizado en la isla se han caracterizado por separar los grupos por macroalgas, pastos e invertebrados marinos y estos últimos separarlos por Phylum.

Las macroalgas desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos y costeros, ya que son esenciales para los ciclos biogeoquímicos al realizar la fotosíntesis y fijar el carbono (Duarte *et al.*, 2017). También proporcionan hábitats y refugios para diversas especies de fauna marina, como invertebrados y peces (Dayton, 1985). Además, son útiles como indicadores de la calidad del agua y de la salud de los ecosistemas, ya que responden a cambios en las condiciones ambientales (Leal *et al.*, 2014). Con relación a las macroalgas, las Chlorophyta fueron las más abundantes (Figura 14), seguidas por las Rhodophyta, mientras que las Ochrophyta representaron el porcentaje más bajo. Sin embargo, esta investigación representa únicamente el 16.56% de las especies reportadas por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991), quienes documentaron 344 especies para la isla de Cozumel. De estas, 33 coinciden con este trabajo, lo que equivale al 11.45%, siendo 10 Rhodophyta, una Ochrophyta y 22 Chlorophyta.

Por otra parte, Mateo-Cid y Mendoza-González (2007) reportaron 403 taxones en su listado actualizado, elaborado a partir de referencias bibliográficas y de herbarios. Este trabajo representa solo el 14.14% de ese listado, con 42 especies compartidas (10.42%), desglosadas en 13 Rhodophyta, tres Ochrophyta y 23 Chlorophyta. Cabe mencionar que el listado de 1991 de estos autores abarcó parte de la misma zona de estudio de este trabajo, sin embargo algunos organismos incluidos corresponden a otras áreas de la península de Yucatán, Campeche y el Caribe Mexicano, lo cual explicaría el hecho de que presenten un listado muy extenso de especies.

Carranza-Ramírez *et al.* (2023) reportaron 42 taxones de macroalgas en el PNAC, de las cuales 13 especies son compartidas, desglosadas en dos Rhodophyta, dos Ochrophyta y nueve Chlorophyta, demostrando que también hay una composición distinta de especies, por consiguiente, a pesar de la cercanía con el PNAC, se presentó una mayor riqueza de especies en la zona noroeste que en el PNAC. Sánchez-Molina (2007) menciona que hay un mayor crecimiento y desarrollo del número de especies cuando hay condiciones de bajo o nulo oleaje, lo que es consistente en las condiciones de la zona de trabajo en comparación con las condiciones del PNAC. Las condiciones de variables como una menor profundidad, mayor luz y nutrientes (en este caso provenientes de la zona de las lagunas costeras al norte y fuentes antropogénicas), tiende a presentar una mayor diversidad de especies de macroalgas (Lobban *et al.*, 1985; Kamer *et al.*, 2002; Torres *et al.*, 2020), las cuales son concordantes con las condiciones que se presentan en el área de estudio.

Se identificaron nueve especies que no habían sido registradas anteriormente para la isla de Cozumel, las cuales son: *Avrainvillea silvana*, *Boodleopsis verticillata*, *Udotea dotyi*, *Udotea fibrosa*, *Meristotheca spinella*, *Digenea arenahuriens*, *Digenia mexicana*, *Alsidium seaforthii* y *Padina pavonica*. No obstante, sí han sido reportado en otras zonas costeras de los estados de Quintana Roo y Yucatán, aunque no se especifica en cuales áreas (Mendoza-González *et al.*, 2016; Acosta-Calderón *et al.*, 2018).

El tipo de sedimento predominante en la mayoría de las estaciones (de E1A a E5A) fue la arena muy fina. En las estaciones E6A y E6B se registraron principalmente arena fina y arena gruesa, respectivamente; además, en esta última se localiza un muelle, considerado un sustrato duro de origen artificial. Por su parte, en las estaciones E7A y E8A se observaron arenas medias y gruesas; sin embargo, en esta última también se presentan pozas de marea, las cuales constituyen un sustrato rocoso natural. En todas las estaciones se registró una mayor abundancia de Chlorophyta, seguida de Rhodophyta y Ochrophyta a lo largo de los tres muestreos. Esto evidencia una clara afinidad de estos grupos por sustratos arenosos (playas arenosas), tendencia que fue corroborada por los análisis nMDS y ji-cuadrada.

Taylor (1954) señala que las partículas mayores a 60 mm (-5 phi) dificultan el establecimiento de macroalgas; no obstante, algunas algas verdes han desarrollado mecanismos de fijación que les permiten mantenerse adheridas al sustrato a pesar del oleaje. De manera consistente, Gándara *et al.* (2007) reportan que Géneros como *Halimeda* y *Udotea* se ven favorecidos en sustratos arenosos. En la misma

línea, Patiño-Espinosa *et al.* (2022) documentaron el establecimiento de especies de *Halimeda* en áreas arenosas del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. Por su parte, Garduño-Solórzano *et al.* (2007) registraron la presencia de *Halimeda*, *Udotea* y *Caulerpa* sobre sustratos arenosos tanto en el Mar Caribe como en el Golfo de México. Asimismo, Carranza-Ramírez *et al.* (2023) describen la capacidad de Géneros como *Dictyota*, *Dasya*, *Halimeda*, *Penicillus* y *Rhipocephalus* para establecerse en distintos tipos de sustrato dentro del PNAC, incluyendo rocas y arena. Finalmente, Mayra-García *et al.* (2013) reportan una mayor abundancia de macroalgas Rhodophyta en sustratos rocosos o duros en comparación con los arenosos.

Al comparar los resultados de este estudio con otros realizados en el Caribe mexicano, la riqueza registrada en la zona noroeste de Cozumel puede considerarse alta. Por ejemplo, uno de los pocos trabajos que evalúan de manera conjunta la riqueza de macroalgas e invertebrados es el de González-Solís *et al.* (2021), quienes reportaron 39 especies en la laguna de Banco Chinchorro, Quintana Roo, incluyendo macroalgas (Chlorophyta, Rhodophyta y Ochrophyta) e invertebrados marinos (Porífera y Cnidaria). En ese estudio, el Phylum Cnidaria presentó la mayor riqueza, seguido por las macroalgas, Porifera y, en menor proporción, Ochrophyta, Chlorophyta y Rhodophyta.

Por otra parte, González-Solís *et al.* (2018) registró 73 especies de macroalgas y una fanerógama asociada a arrecifes coralinos en la Sonda de Campeche, el Mar Caribe y Belice, siendo la División Rhodophyta la que obtuvo mayor riqueza. En ese mismo trabajo se menciona que, en la zona sur de Cozumel, únicamente se

documentaron 15 especies asociadas a arrecifes coralinos, un valor considerablemente inferior a lo encontrado por Carranza-Ramirez *et al.* (2023) y por el presente estudio. Esta diferencia puede atribuirse al reducido número de estaciones muestreadas por González-Solís (2018), que fue únicamente una.

Asimismo, Patiño-Espinosa *et al.* (2022) registraron 61 taxones de macroalgas en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo, identificando 29 especies de Rhodophyta, 22 de Chlorophyta y nueve de Ochrophyta. Los autores atribuyen la distribución y presencia de estos grupos a factores ambientales, particularmente al tipo de sustrato, tanto biótico como abiótico. Aunque el principal sustrato que se consideró fue el abiótico, en ambos estudios hay influencia de nutrientes por parte de zonas con manglares.

Vilchis *et al.* (2018) documentaron 118 especies de macroalgas para el Golfo de México y el Caribe mexicano, de las cuales 59 pertenecen a Rhodophyta, 34 a Chlorophyta y 25 a Ochrophyta. En contraste, en el presente estudio la mayor riqueza correspondió a Chlorophyta, seguida de Rhodophyta y, finalmente, Ochrophyta. Los autores también señalan que Quintana Roo es el estado con mayor riqueza registrada, con 108 taxa pertenecientes a estas tres Divisiones. Comparando dichos valores con los obtenidos en este trabajo, la zona noroeste de Cozumel representaría aproximadamente el 49.07% de la riqueza reportada para Quintana Roo. No obstante, es importante subrayar que la composición específica difiere entre ambos estudios y que las metodologías empleadas para la identificación taxonómica tampoco fueron equivalentes, lo cual limita las comparaciones directas.

La riqueza específica es una de las métricas más simples para evaluar la biodiversidad, pues se basa únicamente en el número de especies presentes, sin considerar su abundancia o valor de importancia (Moreno, 2000). En este estudio, la riqueza de macroalgas, pastos marinos e invertebrados se analizó tanto espacialmente (entre estaciones de muestreo) como temporalmente. La mayor riqueza de macroalgas se registró en las estaciones E1A (28 especies), E6A (26 especies) y E2A y E5A (22 especies cada una). La distribución observada no se asoció a variaciones en las variables fisicoquímicas, dado que estas se mantuvieron relativamente homogéneas entre estaciones. Por ello, se consideró que los patrones de distribución están más relacionados con las características sedimentarias. Las estaciones E1A, E2A y E5A presentaron composiciones similares, dominadas por sedimentos de arena fina y arena muy fina. Aunque las macroalgas pueden establecerse en sustratos arenosos, diversos estudios señalan que la mayor riqueza suele ocurrir en sustratos rocosos o pedregosos (Guilarte, 2013; Patiño-Espinosa, 2022). Este patrón coincide con la estación E6A, ubicada junto a un muelle, donde la presencia de superficies duras favorece el asentamiento de más especies. Sin embargo, otros trabajos, como el de Carranza-Ramírez *et al.* (2023), han registrado una mayor diversidad en sustratos arenosos dentro del PNAC, lo cual es consistente con los resultados obtenidos. Una posible explicación para la elevada riqueza observada en estas estaciones es el mayor aporte de nutrientes provenientes de la laguna costera situada al norte de la isla (En especial para las estaciones E1A, E2A y E5A). González-Solís *et al.* (2018) señaló que nutrientes como nitrógeno y fosfatos pueden limitar el crecimiento de las

macroalgas, por lo que un aumento en su disponibilidad podría favorecer la riqueza registrada.

Patiño-Espinosa (2022) reportó que la mayoría de las especies registradas en sustratos arenosos correspondieron a Chlorophyta, un patrón que coincide con lo observado en este estudio. Por otra parte, las divisiones Rhodophyta y Ochrophyta no mostraron el mismo comportamiento. Aunque estas suelen presentar mayor afinidad por sustratos rocosos, en este trabajo también se registraron en la zona del muelle (E6A y E6B) y en pozas de marea (E8A), al igual que las Chlorophyta, tuvieron una mayor representación en zonas arenosas.

A lo largo del tiempo, la riqueza de macroalgas mostró una baja similitud, especialmente en comparación con 2018, mientras que 2022 y 2023 compartieron una composición parcialmente semejante. Estas variaciones podrían estar relacionadas con las distintas épocas climáticas en que se realizaron los muestreos. Cozumel presenta dos periodos predominantes, lluvias (noviembre–abril) y secas (mayo–octubre), además de los efectos residuales del huracán Michelle (Weather Spark, 2025). Asimismo, cambios en la calidad del agua, derivados tanto de procesos naturales como de actividades antropogénicas, pueden influir en la distribución de las macroalgas. Esto sugiere un posible proceso de sucesión ecológica, donde algunas especies son reemplazadas gradualmente por otras con mayor tolerancia a incrementos de nutrientes o a variaciones ambientales, por consiguiente, un crecimiento excesivo de dichas macroalgas tolerantes.

Estos resultados coinciden con estudios realizados en la laguna de Chelem, Yucatán, donde se obtuvo un índice de similitud de 0.45 entre temporadas de lluvias

y secas, considerado bajo por los autores (Ortegón-Aznar, 2009). De manera similar, Quan-Young *et al.* (2006) reportaron valores inferiores a 0.5 al comparar diferentes estaciones climáticas. Falcón-Vidal *et al.* (2019) también señala que la composición de macroalgas en zonas costeras está fuertemente influenciada por la estacionalidad, las variables fisicoquímicas y los aportes de nutrientes relacionados con impacto antropogénico. Al comparar la riqueza de especies entre la zona cercana a la costa y las áreas más alejadas (ubicadas entre 80 y 200 m y representadas por las estaciones E3B y E6B), se observó una mayor diversidad en los sitios adyacentes a la playa. Esto coincide con lo señalado por Valiela *et al.* (1997), quienes describen que las zonas costeras reciben mayores aportes de nutrientes provenientes del continente, favoreciendo procesos de recirculación en comparación con áreas más distantes. Airolidi (2003) respalda esta idea al destacar el papel de los aportes terrestres en la dinámica costera.

En cuanto a las fanerógamas marinas, Lot-Helgueras (2008) reporta para la isla de Cozumel la presencia de tres especies de Tracheophyta: *Thalassia testudinum*, que domina las praderas; *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*, que se encuentran asociadas de manera conspicua. Los resultados de este estudio coinciden plenamente con dicho registro, ya que se identificaron las mismas tres especies formando praderas poliespecífica (Figura 39). Esto representa el 50% de las especies documentadas para el estado de Quintana Roo y el 27.27% de las registradas a nivel nacional (Herrera-Silveira *et al.*, 2019).

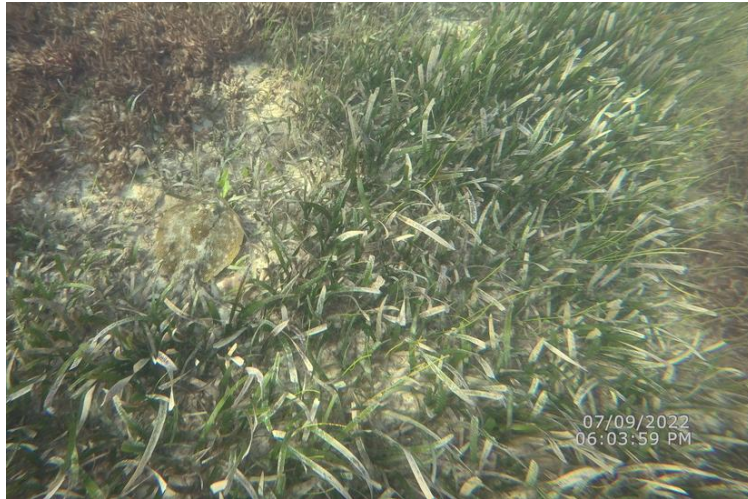


Figura 39. Pradera poliespecífica de pastos marinos.

La distribución espacial de los pastos marinos mostró un patrón similar al observado para las macroalgas: la mayor riqueza se concentró entre las estaciones E2A y E6A, mientras que la similitud entre los tres muestreos se mantuvo relativamente constante. Esto se explica por estar únicamente tres especies en el área de estudio. Patrones espaciales y temporales semejantes han sido documentados en otras regiones, donde es común la coexistencia de pastos marinos y macroalgas (Díaz-Merlano *et al.*, 2003). El incremento de la temperatura registrado a lo largo de los años no parece haber afectado la riqueza específica. No obstante, la presencia de especies del Género *Caulerpa* puede generar competencia con las fanerógamas marinas por luz y nutrientes, estableciendo relaciones de oportunismo e incluso desplazando a las comunidades de pastos marinos bajo condiciones extremas (Taplin *et al.*, 2005; Gallegos-Martínez, 2010; Glasby, 2013; Fuentes *et al.*, 2014). Además, se ha documentado que la perturbación física de los rizomas favorece la

propagación de *Caulerpa* (Ceccherelli *et al.*, 2014). Por lo tanto, las praderas marinas pueden verse comprometidas por diversos factores ambientales, como el incremento de la temperatura del agua, la presencia de especies capaces de desplazar a las poblaciones nativas y el aporte antropogénico de nutrientes que favorece la proliferación de macroalgas oportunistas. A ello se suma la fragmentación de las praderas en parches cada vez más pequeños, lo que refuerza la necesidad de mantener un monitoreo continuo de estos ecosistemas.

Aunque las praderas poseen cierta capacidad de recuperación, este proceso requiere varios años y condiciones sin perturbaciones. Hall *et al.* (2021) documentaron que, tras un evento de hipersalinidad en las costas de Florida que provocó una amplia mortandad de pastos marinos, las poblaciones lograron recuperarse a niveles superiores a los registrados antes del disturbio, gracias al papel de especies fundamentales como *Halodule wrightii* y *Syringodium filiforme*.

Por su parte, Rodemann *et al.* (2025) reportaron que las praderas marinas en Florida se fragmentaron en múltiples parches debido a la degradación de la calidad del agua, el desarrollo costero, el aumento de la temperatura y las olas de calor marinas. Si bien se observó cierta recuperación, la composición y configuración del paisaje de vegetación acuática sumergida quedaron significativamente alteradas

Una problemática con la bibliografía que hay en Cozumel, es la falta de información sobre la localización dentro de la isla, complicando la comparación de las condiciones fisicoquímicas y sedimentarias con este trabajo. Esta situación se dio principalmente en los grupos de las Tracheophytas marinas y los invertebrados marinos bentónicos.

Riqueza específica de invertebrados marinos

De las 141 especies registradas en este estudio, se identificaron 81 especies de invertebrados marinos. Estas se agruparon en los siguientes Phyla: Porifera (cuatro especies), Cnidaria (20 especies), Annelida (seis especies), Mollusca (17 especies), Arthropoda (13 especies) y Echinodermata (21 especies).

En Cozumel, Maas y Bahena (2008) reportaron 11 especies de Porífera. En la presente investigación se identificaron cuatro taxa, de los cuales únicamente *Ircinia strobilina* coincide con los registros previos para la isla. Por su parte, Suárez-Moo (2024), mediante técnicas de biología molecular, documentó hasta 29 especies de esponjas en cuevas anquialinas de Cozumel, incluyendo tanto especies litorales como de aguas profundas.

Las diferencias en la riqueza específica reportada entre estos trabajos pueden atribuirse principalmente a las particularidades ambientales de los hábitats muestreados. Las cuevas anquialinas reciben aportes de agua provenientes de cenotes, manglares y del mar Caribe, lo que favorece un alto intercambio hidrológico y el transporte de larvas desde zonas profundas a través de surgencias (Harmelin & Vacelet, 1997; Gómez & Calderón-Gutiérrez, 2020; Suárez-Moo, 2024). Estos procesos promueven una mayor diversidad en comparación con los ambientes intermareales evaluados en este estudio.

En la isla de Cozumel se han documentado 73 especies de corales hermatípicos (hexacorales e hidrocorales). En el presente estudio se identificaron nueve especies, lo que representa el 12.3% de lo reportado para la isla según Jordán

(2008), y coincide parcialmente con los registros de Reyes-Bonilla *et al.* (2014), quienes mencionan 20 especies de corales escleractinios, de las cuales cinco coinciden con este trabajo.

Para el Phylum Annelida, Ochoa-Rivera *et al.* (2000) reportan 42 especies de poliquetos en Cozumel. En esta investigación se identificaron seis taxa, que equivalen al 14.28% de las especies registradas para la isla, con solo dos coincidencias específicas. Por su parte, Granados-Barba *et al.* (2003) documentan aproximadamente 45 especies de poliquetos en el Golfo de México y parte del Caribe mexicano, incluyendo Cozumel.

En cuanto al Phylum Mollusca, Lozano-Guzmán (2021) y González (2008) reportan 57 especies en Cozumel, entre quitones, gasterópodos y bivalvos. Este estudio comparte ocho de ellas, lo que corresponde al 14.03% del total conocido para la isla; no obstante, las 17 especies registradas representarían el 29.82% de su riqueza total. Además, Rosenberg *et al.* (2009) señalan que la diversidad de gasterópodos de Cozumel equivale al 87.93% de la diversidad reportada para Quintana Roo, por lo que los moluscos registrados en esta investigación corresponderían aproximadamente al 26.22% de la riqueza estatal.

El Phylum Arthropoda cuenta con 140 especies registradas en Cozumel, particularmente dentro de la clase Decapoda (Mejía-Ortíz *et al.*, 2008). En el presente estudio solo se identificaron seis especies que coinciden con dicho registro, lo que representa únicamente el 4.28% del total reportado para la isla.

En cuanto a los equinodermos, su nivel de diversidad puede explicarse por la amplia variedad de hábitats presentes en Cozumel; como arrecifes coralinos, fondos arenosos y praderas de pastos marinos (Alvarado & Solís-Marín, 2012). Solís-Marín *et al.* (2008) documentaron 81 especies de Echinodermata en la isla, basándose en ejemplares preservados en colecciones, aunque sin especificar las zonas exactas de colecta. El presente trabajo comparte 17 de esos taxa y coincide además en los rangos de profundidad donde fueron registrados. En conjunto, las especies identificadas aquí representan el 20.98% de la diversidad conocida para Cozumel.

En comparación con otros estudios realizados en el Caribe, González-Solís y Torruco (2015) registraron 134 especies de invertebrados marinos en la zona intermareal de Quintana Roo, incluyendo 84 especies de moluscos, 15 equinodermos, 23 crustáceos decápodos y 10 anélidos. En contraste con el presente trabajo, su estudio reportó una riqueza mayor en la mayoría de los grupos, excepto en el caso de los equinodermos. No obstante, es importante señalar que su investigación abarcó diversas playas a lo largo del estado y se enfocó únicamente en sustratos rocosos, mientras que este estudio incluye zonas con sustrato rocoso, arenoso y mixto dentro de una única área de Cozumel.

Por su parte, Campos-Vázquez *et al.* (1999) trabajaron principalmente con criptofauna en Punta Nizuc y registraron 6 especies de esponjas, 6 cnidarios, 64 poliquetos, 46 moluscos, 36 crustáceos y 24 equinodermos, además de 39 especies pertenecientes a otros Phyla. La mayor riqueza observada en su estudio puede atribuirse a que las zonas evaluadas no presentaban perturbación turística y se encontraban bajo protección, a diferencia de las condiciones actuales del área

analizada en este trabajo. Como señala Warne (1975), los sitios protegidos y con menor presión antrópica suelen albergar una mayor riqueza de especies de criptofauna en comparación con arrecifes o zonas expuestas al oleaje.

Debido al limitado número de estudios sobre invertebrados marinos en Cozumel, los resultados se compararon con investigaciones realizadas a lo largo de la península de Yucatán y el Caribe mexicano. Ugalde *et al.* (2015) registraron 19 especies del Phylum Porifera en tres arrecifes de la península; sin embargo, la autora no describe las condiciones ambientales de los sitios y ninguna de esas especies coincidió con las encontradas en este estudio. Por su parte, González-Muñoz *et al.* (2012) y González-Muñoz *et al.* 2018, reportaron 15 especies de Cnidaria del orden Actiniaria en el Caribe mexicano. En el presente trabajo únicamente se identificaron tres especies de ese orden, compartiendo dos con dichos estudios.

Torruco *et al.* (2021) documentaron alrededor de 62 especies de corales duros en los principales arrecifes del Caribe mexicano y Belice. Ocho especies de cnidarios determinadas en este estudio coinciden con las registradas por esos autores, lo que representa aproximadamente el 12% del total que reportan. Asimismo, Rey-Villiers *et al.* (2023) mencionan que los arrecifes de Cuba albergan cerca de 55 especies de octocorales, considerándose una de las mayores riquezas del Caribe.

En cuanto al Phylum Annelida, Miranda-Salinas *et al.* (2016) reportan 49 especies en la península de Yucatán, principalmente en arrecifes coralinos y, en menor proporción, en fondos blandos. Este patrón coincide parcialmente con lo observado en este estudio, donde los anélidos se encontraron con mayor frecuencia en

sustratos blandos, debido a la ausencia de formaciones coralinas extensas en la zona de muestreo. Granados-Barba *et al.* (2003) identificaron 45 especies de poliquetos en el Golfo de México y el Caribe mexicano, incluyendo Cozumel; no obstante, no especifican cuántas de estas corresponden a la isla, lo que dificulta una comparación directa.

Respecto al Phylum *Mollusca*, los estudios de diversidad han sido más consistentes. En 2011 se habían registrado 675 especies en el Caribe y, apenas tres años después, el número aumentó a 985, lo que representa un incremento cercano al 50%. Este rápido crecimiento sugiere que aún existen numerosas especies por documentar en la región (Castillo-Rodríguez, 2014; Hernández & Álvarez, 2019). La diversidad de moluscos puede variar considerablemente entre localidades. Por ejemplo, en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos se registraron 120 especies de moluscos (Hernández & Álvarez, 2019), mientras que en este estudio solo se identificaron 17. En ambos casos predominó la clase Gastropoda; sin embargo, únicamente tres especies fueron comunes entre ambas regiones. En cuanto al Orden Decápoda, perteneciente a la clase Malacostracea, este grupo destaca por ser el más diverso, con aproximadamente 618 taxa que representan el 64% de la diversidad de la clase en el Golfo de México (García-Madrigal *et al.*, 2012). En el Caribe mexicano se han descrito 127 taxa, lo que equivale al 7% de los registros nacionales. Todas las familias reportadas para esta región estuvieron presentes en este estudio, lo cual puede atribuirse a la amplia distribución de los decápodos en el Golfo de México y el Caribe, así como a la baja proporción de endemismos en la zona (Felder *et al.*, 2009; Álvarez *et al.*, 2014).

Por otra parte, el Caribe mexicano alberga la mayor riqueza de equinodermos registrada para el Caribe, con 182 de las 433 especies reportadas para la región (Alvarado, 2011). Estudios realizados en Quintana Roo, como los de Tzompantzi (1999) y Durán-González (2024), registraron 14 especies de equinoideos, tres de crinoideos y 28 de asteroideos. Solo seis de las especies de equinoideos coincidieron entre dichos trabajos, mientras que no hubo especies compartidas para las otras dos clases. Esto probablemente se deba a que sus muestreos se llevaron a cabo a profundidades superiores a 200 m, donde predominan especies propias de aguas profundas, a diferencia del presente estudio, cuyo muestreo fue realizado en aguas someras.

La distribución de los invertebrados mostró un patrón espacial definido. La mayor riqueza específica se concentró entre las estaciones E6A y E8A. Particularmente, la estación E6B registró el número más alto de taxa (49 especies), seguida de E6A con 36 especies, y de las estaciones E7A y E8A, ambas con 31 especies. En este mismo conjunto de estaciones se observaron representantes de los seis Phyla registrados, lo que evidencia una alta diversidad biológica en la zona.

Este patrón de distribución puede atribuirse a características ambientales y estructurales del área. En E6A y E6B, la presencia de un muelle proporciona un sustrato firme donde numerosos invertebrados pueden fijarse, mientras que E8A corresponde a una zona de pozas de marea, ambientes conocidos por albergar microhábitats que favorecen la concentración de especies. Asimismo, el índice de similitud de Jaccard mostró valores superiores a 0.71 entre los tres muestreos, lo que indica una composición relativamente consistente a través del tiempo. La mayor

riqueza encontrada en playas rocosas y zonas con estructuras estables coincide con lo reportado en la literatura, ya que estos sustratos ofrecen superficies firmes que permiten a los organismos anclarse y evitar el arrastre por corrientes. Además, reducen la acumulación de sedimentos, proporcionan refugios naturales mediante grietas y cavidades y mantienen una mayor disponibilidad de alimento, como macroalgas y plancton (Hernández *et al.*, 2010; Siddik y Satheesh, 2021; Bae *et al.*, 2022).

Los resultados obtenidos coinciden con la distribución observada en las macroalgas, particularmente por la alta riqueza de especies registrada en la estación E6A. Vassallo *et al.* (2014) documentaron 195 especies de invertebrados en zonas de costa rocosa en Montepío, Veracruz, donde los grupos más diversos pertenecieron a los Phyla Crustacea, Mollusca y Echinodermata. De manera similar, Sibaja-Cordero *et al.* (2014) reportaron una mayor diversidad de invertebrados en playas rocosas respecto a las arenosas, con predominio de Mollusca, Crustacea y Sementaria y Amphinomida. Ríos-Jara *et al.* (2008) también señalaron que los equinodermos presentan una mayor riqueza en hábitats rocosos que en sustratos arenosos.

Los resultados de este estudio son consistentes con la evidencia previa que destaca la afinidad de los invertebrados marinos por sustratos rocosos. En particular, la presencia del muelle funciona como un hábitat favorable para numerosas especies, especialmente las sésiles, que no podrían establecerse sobre el sustrato arenoso natural de la zona debido a su inestabilidad (Sibaja-Cordero *et al.*, 2014; Carlton *et al.*, 2017; Pinochet *et al.*, 2020). Esto coincide con lo reportado por Cowles *et al.*

(2019), quienes observaron un aumento en la diversidad y riqueza de especies a lo largo del tiempo en ambientes submareales con sustratos rocosos.

La distribución y el establecimiento del Phylum Porifera han sido ampliamente documentados en sustratos artificiales. David-Colón y Marín-Casas (2020) señalan que estos sustratos pueden albergar una mayor diversidad de esponjas en comparación con los sustratos naturales. De manera similar, de la Cruz-Francisco (2025) reporta un número superior de especies en sustratos artificiales, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este estudio, donde la zona del muelle presentó una mayor riqueza específica.

En el caso del Phylum Cnidaria, su presencia también estuvo determinada por el tipo de sustrato, en concordancia con lo descrito por Gómez-Petersen *et al.* (2023). No obstante, aunque diversos autores han documentado cambios en la composición de especies ante incrementos en la temperatura (Fernández *et al.*, 2014), este patrón no se observó en el presente trabajo, pese a las diferencias térmicas registradas entre los años de muestreo.

Las especies de Anelidos, se registraron tanto en el sustrato artificial del muelle como en los sustratos arenosos de las estaciones E6A y E6B (Figura 40). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Omena *et al.* (2012), quienes también documentaron su asistencia en playas arenosas con sedimentos de granulometría media a gruesa. Sin embargo, dichos autores destacan que su establecimiento no depende únicamente del tipo de sustrato, sino también de otros factores ambientales que influyen en su distribución. Los hallazgos reportados por Torreblanca-Ramírez *et al.* (2012) y Galeana-Rebolledo *et al.* (2012), quienes

documentan una mayor diversidad de moluscos gasterópodos y poliplacóforos en zonas intermareales rocosas, tanto naturales como artificiales, debido a la estabilidad espacial y temporal del sustrato y al reducido oleaje, coinciden con lo observado en este estudio. En particular, la zona de pozas de marea (E8A), caracterizada por sustrato rocoso y bajo oleaje, presentó la mayor riqueza de especies de moluscos, lo que confirma que las condiciones de estos microhábitats favorecen el establecimiento persistente de dichos organismos.

Por otra parte, la distribución espacial y temporal de los crustáceos decápodos no mostró variación entre especies a lo largo de los tres muestreos. Este patrón concuerda con lo señalado por Quirós y Campos (2010), quien asocia la estabilidad de las poblaciones de decápodos con las características del sustrato rocoso. De manera similar, los equinodermos se establecieron principalmente en áreas con sustrato artificial del muelle, en las pozas de marea y en las zonas arenosas, lo cual coincide con lo reportado por Bolaño *et al.* (2005) y Celaya-Hernández *et al.* (2008).

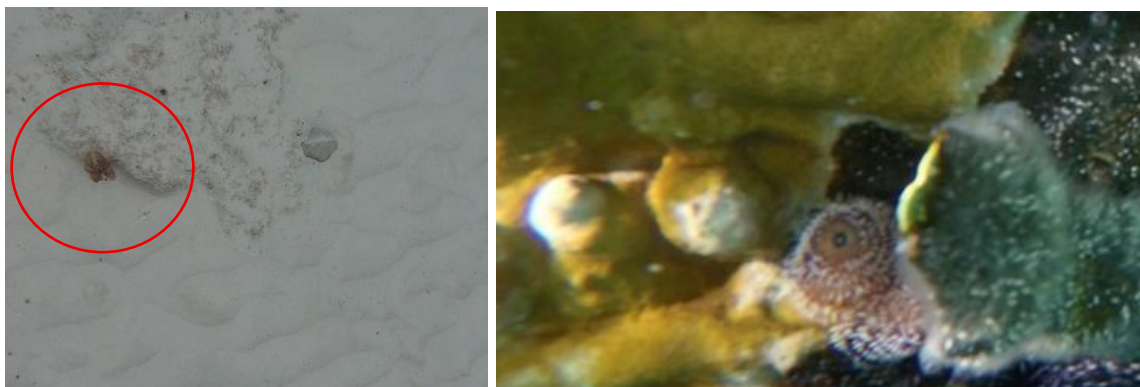


Figura 40. *Anamobaea orstedii* y *Spirobranchus giganteus* en diferentes sustratos dentro de la estación E6A y E6B.

Especies bioindicadoras de contaminación

La biología de la conservación emplea diversas herramientas para evaluar el estado y las transformaciones de los ecosistemas. Entre ellas, la bioindicación o biomonitoreo mediante taxones indicadores constituye una estrategia fundamental para analizar los efectos de los cambios ambientales, así como la alteración y fragmentación de los hábitats (Market *et al.*, 2021). Las especies bioindicadoras se seleccionan por características como su sensibilidad a perturbaciones ambientales, patrones de distribución, abundancia, capacidad de dispersión y éxito reproductivo, lo que permite inferir el estado de otras especies o de las condiciones del ambiente (Soto *et al.*, 2021). Gracias a estas propiedades, se han convertido en una herramienta clave para evaluar la calidad del agua (Barbour *et al.*, 1999; Heink & Kowarik, 2010).

En ambientes marinos, las especies bioindicadoras son particularmente relevantes para diagnosticar la calidad ambiental y los niveles de nutrientes en los ecosistemas acuáticos. Grupos como las macroalgas y otros organismos bentónicos destacan por su sensibilidad a las variaciones de su entorno, lo que los hace útiles para detectar cambios tanto naturales como antropogénicos (Bello y Maldonado, 2014; Ortiz, 2014; Contreras & Velázquez, 2015; Meléndez, 2022; Vergara-Carranza *et al.*, 2024).

En este estudio se identificaron cuatro especies de macroalgas reconocidas como bioindicadoras de contaminación por nutrientes (Meléndez, 2022; Vergara-Carranza *et al.*, 2024). *Ulva intestinalis* se registró en las estaciones E1A, E2A, E5A, E6A y E6B durante los años 2018 y 2023, distribuida en distintos manchones dentro de estas localidades (Figura 41). Esta especie ya había sido reportada previamente en la isla, particularmente en los arrecifes del PNAC como el Arrecife Colombia a profundidades de hasta 27 metros (Carranza-Ramírez *et al.*, 2022). En contraste, en el presente trabajo no se observaron profundidades superiores a los 6 metros, lo cual coincide con lo descrito por Calva-Benítez y Torres-Alvarado (2008) y Nava-Olvera *et al.* (2017), quienes la han documentado principalmente en la zona intermareal.

La segunda macroalga identificada como bioindicadora fue *Chaetomorpha gracilis*, registrada en las estaciones E1A y E6B durante los años 2022 y 2023. Esta especie también ha sido citada previamente por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991; 2007). En las costas del Atlántico mexicano se ha observado una mayor abundancia durante la temporada de lluvias (Quiroz-González *et al.*, 2017), patrón que coincide con los resultados obtenidos, dado que su presencia se limitó a los muestreos realizados en julio de 2022 y julio de 2023. Este comportamiento podría atribuirse al incremento de nutrientes asociado a dicha temporada, tal como señalan Anderson *et al.* (2002) y Paerl y Paul (2012), quienes destacan que los pulsos de nutrientes durante las lluvias favorecen el florecimiento de algas.

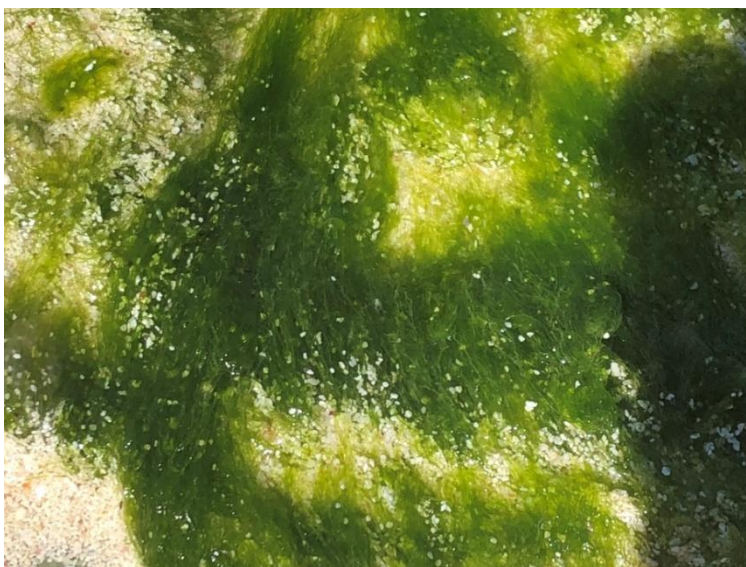


Figura 41. *Ulva intestinalis* en la zona noroeste de la isla de Cozumel

Hypnea spinella fue registrada en la estación E3A durante 2022, y su asistencia en Cozumel ya había sido documentada previamente por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991) y Mateo-Cid y Mendoza-González (2007). Esta especie se reconoce como un indicador de enriquecimiento por nutrientes, debido a su alta tolerancia a fuentes elevadas de nitrógeno, incluyendo descargas de aguas residuales, actividades acuícolas y escorrentía agrícola (Piñón-Gimate *et al.*, 2009; Vergara-Carranza *et al.*, 2024).

Por su parte, *Laurencia intricata* se localizó en las estaciones E5A, E6A y E6B durante los años 2022 y 2023. En Cozumel, su presencia ha sido reportada previamente por Mateo-Cid y Mendoza-González (1991) y Mateo-Cid y Mendoza-González (2007), así como por Carranza-Ramírez *et al.* (2022) en arrecifes del PNAC. Esta especie ha sido asociada con zonas afectadas por descargas de aguas residuales, dada su capacidad para acumular concentraciones

elevadas de fósforo (Lapointe *et al.*, 2004; Reef *et al.*, 2012; Meléndez, 2022; Vergara-Carranza *et al.*, 2024).

Es importante señalar que, en el caso de los invertebrados marinos, se identificaron dos tipos de bioindicadores. Por un lado, los indicadores de acumulación, que reflejan la presencia de contaminantes sin afectar el desempeño del organismo, ya que estos compuestos se almacenan en sus tejidos. Por otro lado, los indicadores de efecto o impacto, los cuales, además de evidenciar la presencia del contaminante, indican alteraciones fisiológicas o funcionales que pueden comprometer el estilo de vida del organismo (Market *et al.*, 2021).

Se identificaron diversas especies previamente reconocidas como bioindicadoras. Busutil y García-Hernández (2023) señalan que *Aplysina fistularis* puede considerarse indicadora de aguas limpias, de acuerdo con su abundancia relativa, y reportan su distribución en profundidades menores a 10 m, lo cual coincide con lo observado en este estudio. En el presente trabajo, esta especie fue registrada en las estaciones E6B y E7A durante 2018, 2022 y 2023. El hecho de estar presentes en bajas densidades podría sugerir cierto grado de perturbación ambiental, tal como ha sido propuesto por Alcolado (2007).

Los poliquetos, por su respuesta rápida al estrés ambiental, también han sido utilizados como bioindicadores (Elías *et al.*, 2021). En particular, William (2009) describe a *Spirobranchus giganteus* como un indicador de incremento de nutrientes, especialmente fosfatos, al aumentar sus densidades poblacionales. Por otro lado, *Hermodice carunculata* ha sido asociada con la transmisión de enfermedades

producidas por coralicólidos, actuando como vector al alimentarse de corales infectados y propagar los patógenos hacia corales sanos (Bonacolta *et al.*, 2025).

En este estudio, *S. giganteus* estuvo presente en las estaciones E6A, E6B y E7A durante los tres periodos de muestreo, mientras que *H. carunculata* se observó únicamente en E6A y E6B en los años 2018 y 2022. La presencia de *S. giganteus*, junto con la de macroalgas bioindicadoras, coincide con un posible aumento de nutrientes; no obstante, no se registró un número elevado de individuos que sugiriera un impacto severo.

En cuanto a los moluscos, su carácter de especies oportunistas o altamente especializadas les permite manifestar respuestas claras frente a modificaciones del hábitat y a la contaminación. Dichas respuestas pueden observarse tanto a nivel individual como poblacional, reflejándose en cambios de comportamiento, fisiología y tolerancia ambiental (Baqueiro-Cárdenas *et al.*, 2007). Los moluscos bivalvos han sido ampliamente estudiados y destacan por su utilidad como especies bioindicadoras y biomonitoras, en mayor medida que los gasterópodos. En este estudio, la estancia de *Octopus vulgaris* en la estación E6B durante 2023 es consistente con lo señalado por González *et al.* (2015), quienes la identifican como indicadora de condiciones ambientales favorables debido a su ciclo de vida corto. Por otro lado, *Acanthopleura granulata* ha sido descrita como un biomonitor de mercurio; Mercado-Morales *et al.* (2022) documentan una relación inversa entre el tamaño del organismo y la acumulación de este metal.

En el caso de los crustáceos, aunque han sido menos estudiados como bioindicadores, especies del Género *Balanus sp.* se han utilizado para monitorear

la presencia de metales pesados como el cadmio, registrando tendencias en su biodisponibilidad (da Silva *et al.*, 2009). Asimismo, *Leptuca pugilator* se ha empleado como indicador de actividad antropogénica, dado que el comportamiento de “ondeo” de los machos disminuye con el incremento de disturbios humanos (DiNuzzo *et al.*, 2020).

Algunos equinodermos también se consideran bioindicadores por su sensibilidad a variaciones en la calidad del agua, la temperatura y la contaminación (González-Delgado *et al.*, 2024). Dentro de las especies registradas en este estudio, *Oreaster reticulatus* se asocia con hábitats de baja perturbación humana (Tagliafico *et al.*, 2012). Aunque Escárcega-Quiroga *et al.* (2019) no proponen a *Eucidaris tribuloides* como bioindicadora, resaltan que la morfología de su linterna de Aristóteles puede variar según las condiciones ambientales, como la salinidad, la temperatura y el tipo de sustrato.

Diadema antillarum y *Lytechinus variegatus* también han sido reportados como biomonitores e indicadores de metales pesados; estudios de Montelongo *et al.* (2017) y Alves *et al.* (2018) relacionan el contenido de metales con la talla de los organismos, proponiéndolos como especies bioindicadoras. De igual manera, da Silva-Silvestre *et al.* (2025) sugieren que *Mellita quinquiesperforata* puede emplearse como bioindicadora mediante el análisis de sus características morfológicas y su desarrollo larvario. Finalmente, la Familia Holothuriidae ha sido catalogada como bioindicadora y biomonitora debido a sus hábitos de vida, que facilitan el contacto constante con contaminantes presentes en el agua y su acumulación en los sedimentos (Parra-Luna *et al.*, 2020).

Índices de similitud

El método de Análisis de Escalamiento Multidimensional Métrico (NMDS) y análisis de conglomerados son análisis que se utilizan para observar y explicar las variaciones espaciales y temporales (Aranibar, 2019; Souza, 2025). En este trabajo a partir de los análisis de similitud se observó que existe diferencia entre la composición de especies de macroalgas y pastos marinos, al contrario de los invertebrados que sí presentaron una similitud entre las estaciones y el tiempo. Asimismo, integrando a los tres grupos de organismos, los análisis de similitud demostraron que hay una homogeneidad en general en la composición de especies a través de los años pero no así entre las estaciones, en otras palabras, en algunas estaciones la composición de especies está regida por macroalgas y pastos marinos y en otras estaciones hay una mayor riqueza de especies de invertebrados marinos, dando como resultado una similitud por debajo del 73%, mientras que el NMDS confirma dicha heterogeneidad entre las estaciones con la formación de cuatro grupos, de la misma forma, las agrupaciones mostraron una homogeneidad a través del tiempo al agruparse las mismas estaciones de los diferentes muestreos pero separarse en las diferentes estaciones a nivel espacial. Ese tipo de análisis ha sido utilizado en otras investigaciones similares, por ejemplo, Suárez y Martínez-Daranas (2020) señala que la composición de macroalgas en la región del Atlántico occidental y subtropical presentan una alta similitud, pero si se considera a partir del 50%, sin embargo, hay una mayor similitud entre zonas del Caribe, sur del Golfo de México y Florida. En este trabajo se atribuye este comportamiento de agrupación principalmente a las características fisiográficas de las estaciones, tanto que, unas

estaciones predominan las arenas medias y arenas finas, en otras las arenas gruesas y la presencia de sustrato artificial (muelle) y hay pozas de marea, por consiguiente, es consistente que exista dicha heterogeneidad en la composición de los organismos, por sus necesidades de asentamiento, nutrientes, alimentación y protección (Vassallo *et al.*, 2014; González-Solís *et al.*, 2018; Patiño-Espinosa, 2022). De manera más detallada, los grupos E2A (2022) y E3A (2023) presentaron una similitud de 65%, compartiendo especies como *Udotea dotyi*, *Neomeris annulata*, *Acetabularia schenckii*, *Centroceras clavulatum*, *Digenea mexicana*, *Alsidium seaforthii*, *Sargassum cf. cymosum*, *Syringodium filiforme*, *Pterogorgia anceps*, *Condylactis gigantea* y *Paguristes cadenati*. El segundo grupo que tiene una mayor riqueza de especies compartidas fue el compuesto por las estaciones E3B (2022 Y 2023) y E4A (2023) con una similitud de 68% compartiendo las siguientes especies: *Pterogorgia anceps*, *Condylactis gigantea*, *Leptuca pugilator* y *Paguristes cadenati*. Dicho resultado es atribuido principalmente a la poca diversidad de especies encontradas en ambas estaciones. El grupo conformado por las estaciones E6A tanto 2022 como 2023, registraron una similitud de 68% compartiendo especies como *Caulerpa cupressoides*, *C. lanuginosa*, *Halimeda scabra*, *Penicillus dumetosus*, *P. lamouroxii*, *Rhipocephalus oblongus*, *R. Phoenix*, *Udotea dixonii*, *U. dotyi*, *Udotea fibrosa*, *U. flabellum*, *Neomeris annulata*, *Dichotomaria marginata*, *Laurencia intricata*, *Sargassum cf. cymosum*, *Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme*, *Ircinia strobilina*, *Asteropus niger*, *Siphonodictyon xamaycaense*, *Millepora alcicornis*, *M. complanata*, *M. striata*, *Sertularella diaphana*, *Gorgonia ventalina*, *Dichocoenia stokesii*, *Condylactis*

gigantea, *Porites porites*, *Siderastrea sidérea*, *Solenastrea bournoni*, *Sabellastarte magnifica*, *Bispira brunnea*, *Anamobaea orstedii*, *Spirobranchus giganteus*, *Agathistoma fasciatum*, *Nerita versicolor*, *Percnon gibbesi*, *Plagusia depressa*, *Pelia mutica*, *Calappa flammea*, *Leptuca pugilator*, *Paguristes cadenati*, *Linckia guildingi*, *Oreaster reticulatus*, *Breviturma paucigranulata*, *Ophiothrix angulata*, *Diadema antillarum*, *Echinometra lucunter*, *Echinometra viridis* y *Tripneustes ventricosus*. El grupo con la mayor similitud (73%) en la riqueza de especies fue el compuesto por las estaciones E6B de los muestreos de 2022 y 2023 las cuales fueron: *Caulerpa cupressoides* var. *Flabellata*, *Laurencia intricata*, *Ircinia strobilina*, *Aplysina fistulari*, *Asteropus niger*, *Siphonodictyon xamaycaense*, *Stylaster roseus*, *Millepora alcicornis*, *Millepora complanata*, *M. striata*, *Pennaria disticha*, *Pterogorgia anceps*, *Gorgonia ventalina*, *Dichocoenia stokesii*, *Pseudodiploria strigosa*, *Condylactis gigantea*, *Porites astreoides*, *P. porites*, *Siderastrea sidérea*, *S. radians*, *Solenastrea bournoni*, *Bispira brunnea*, *Anamobaea orstedii*, *Spirobranchus giganteus*, *Hermodice carunculata*, *Agathistoma fasciatum*, *Cyphoma gibbosum*, *Nerita versicolor*, *Percnon gibbesi*, *Plagusia depressa*, *Stenorhynchus seticornis*, *Mithraculus fórceps*, *Leptuca pugilator*, *Paguristes cadenati*, *Lepas anserifera*, *Oreaster reticulatus*, *Breviturma paucigranulata*, *Ophiothrix angulata*, *Eucidaris tribuloides*, *Diadema antillarum*, *Echinometra lucunter*, *E. viridis*, *Lytechinus variegatus*, *Tripneustes ventricosus* y *Holothuria (Halodeima) mexicana*. Los grupos generada por NMDS tiene la característica que se congregaron a partir de la riqueza de especies que había en cada estación y con su relación con los vectores (variables fisicoquímicas y sedimentarias) lo que refleja diferencias en la

composición biológica entre los sitios de muestreo (Souza, 2025). De manera más detallada se observó que el grupo I estuvo regido principalmente por especies de macroalgas, seguidos de invertebrados y una asociación directa con las variables de salinidad y temperatura y carbono orgánico. El grupo II predominaron especies de macroalgas, seguidas de invertebrados y por último de pastos marinos, siendo el grupo donde se conglomeraron la mayor cantidad de estaciones, lo que indica una mayor estabilidad y condiciones ambientales similares entre ellas. Asimismo, el grupo III tuvo una mayor riqueza de especies de invertebrados, seguida de macroalgas y pastos marinos con una composición homogénea entre las estaciones, igualmente con características ambientales muy similares. Por último, el grupo IV tuvo una riqueza mayor de invertebrados, seguido de macroalgas, sin embargo, su agrupamiento marcadamente separado del resto de grupos, indica un alto grado de disimilitud y esto se atribuye a que es una zona de pozas de marea. Los resultados que se obtuvieron a partir de estos análisis nos ofrecen una idea de cómo son los patrones de distribución en una zona que no es muy amplia respecto a longitud, pero muestra una heterogeneidad de ambientes a partir de la composición (González-Etchebehere *et al.* 2017).

Hábitos alimentarios

Los invertebrados marinos se pueden considerar importantes para la descomposición de la materia orgánica, lo que contribuye a la recirculación de los nutrientes en los ecosistemas acuáticos, mantienen la productividad del ecosistema y sostienen la vida acuática. Los invertebrados marinos son una comida importante

para una amplia variedad de formas de vida acuática, incluidos los peces, las aves y los mamíferos. La filtración y purificación del agua, proceso en el que ciertos invertebrados marinos como los bivalvos participan, contribuyen a la eliminación de partículas suspendidas y contaminantes del agua. Esta acción ayuda a mejorar la calidad del agua y a preservar el equilibrio del ecosistema (Bortolus & Iribarne, 1999; Dauvin & Desroy, 2000). En cuanto a la erosión y sedimentación, los invertebrados marinos tienen la capacidad de afectar la erosión y sedimentación del lecho acuático mediante sus actividades de alimentación y excavación. Estas acciones pueden influir en la estructura morfológica del lecho acuático y en la dinámica de los sedimentos (Ruppert, 2004).

El análisis de componentes principales indicó que una relación baja entre los hábitos alimentarios y las estaciones desde la E1A hasta la E5A de 2018, 2022 y 2023. Esto se atribuye principalmente a que la cantidad de invertebrados presentes en estas estaciones fue muy baja. Por el contrario, el resto de las estaciones (de E6A a E8A de 2018, 2022 y 2023) presentaron relación con los hábitos alimentarios. Esto se atribuye a la presencia de los invertebrados marinos que están presentes en estas estaciones. Las estaciones E8A de 2022 y 2023 es donde hubo una relación mayor entre los organismos herbívoros y detritívoros, en su mayoría organismos de los Phylum Mollusca y Echinodermata (Srivastava & Singh, 2021; Gaitán-Espitia. 2008; Calva. 2002) a pesar de que dicha estación no presentó la mayor riqueza de especies de algas. Mientras que las estaciones E7A de 2023 y E6B de 2022 y 2023 presentaron especies con hábitos prioritariamente filtradores de partículas suspendidas y planctónicos como lo son los Phylum Porífera, Cnidaria y Anellida

(Godefroy *et al.*, 2019; Goldberg. 2018; Riisgård y Larsen. 2010), los cuales tuvieron mayores representantes de especies en esas estaciones y en esos años, en cambio, las estaciones E6A de 2018, 2022 y 2023 así como la E7A de 2018. En estas estaciones y años la relación fue prácticamente con todos los hábitos alimentarios, estos se atribuyen a la estancia de los cinco Phyla en las estaciones y años. La relevancia de los hábitos alimentarios para este trabajo radica en el control de las macroalgas, debido a que, si no son controladas, se podrían volver organismos dominantes y en su caso desplazar a especies de corales, por ejemplo, se ha considerado a los erizos de mar como herbívoros muy efectivos, más que los peces (Mumby *et al.*, 2007; Adam *et al.*, 2015). Por ejemplo, Sangil y Guzmán (2016) revela que *Diadema antillarum*, *Echinometra viridis* y *E. Lucunter* son organismos muy eficientes para el pastoreo de macroalgas. Se ha observado que *E. viridis* es una especie que es herbívora generalistas, consume mayor cantidad de macroalgas por peso de cada organismo, además de ser muy efectivo, lo que es consistente con lo observado en este trabajo, donde en las estaciones que hay presencia de erizos de mar la riqueza de especies de macroalgas es menor, mientras que la abundancia que se observó *in situ* no era la misma a las zonas donde no había invertebrados. Así mismo, las especies de gasterópodos encontradas para este trabajo se determinaron como herbívoras y detritívoras (García-Cubas & Reguero, 2004) la zona de la mayor riqueza de especies fueron dominadas por sustratos duros y artificiales, en especial las pozas de marea, el predominio de estas especies de moluscos herbívoros en esta zona concuerda con lo reportado por Fernández y Jiménez (2006) donde hallaron a especies herbívoros de moluscos Polyplacophora

y Gasteropoda que presentaban una mayor distribución en zonas rocosas y protegidas del oleaje, esto se atribuye a sus condiciones menos severas, las adaptaciones morfológicas y a la presencia de algas, lo que es consistente con lo visto en este trabajo, de forma similar, se observó una mayor concentración de especies de moluscos en la zona protegida de las pozas de marea (estación E8A), asimismo, concuerda que hubo la presencia de macroalgas en la zona, principalmente Chlorophyta. En cambio, los crustáceos (Decápodos) que presentan hábitos mayoritariamente omnívoros, se distribuyeron en las estaciones E6A, E6B y E7A (2018, 2022 y 2023). Estos organismos son importantes en la zona costera ya que son depredadores y presas, promueven el ciclo de nutrientes mediante la bioturbación y regulan las poblaciones de macroalgas, lo que protege la biodiversidad. Su sensibilidad a la contaminación los convierte en indicadores clave de la salud de los ecosistemas costeros (Poore & Ahyong, 2004). Mejía-Ortíz *et al.* (2008). A pesar de que se alimentan de macroalgas, Boudreau y Worm (2012) refieren que tiene una mayor afinidad a ser carnívoros, en especial al consumo de moluscos. Lo que concuerda con la distribución de las especies para este trabajo, donde se presentaron en mayor cantidad las especies de moluscos en donde se registra una mínima cantidad de especies de crustáceos decápodos. Como consecuencia del pastoreo, se liberan espacios para el establecimiento de organismos sésiles como lo son las esponjas de mar y corales (Roth *et al.*, 2013), esto se observó en especial en las estaciones (E6A, E6B y E7A) donde se presentaron los organismos con hábitos de filtrador de partículas y plactívoros que en su mayoría fueron esponjas y corales. Adam *et al.* (2015) menciona que la

herbívoros en arrecifes de coral promueve el crecimiento de los complejos coralinos, lo que coincide con este trabajo en especial en las zonas donde se ubicaban los cinco Phyla estudiados compartiendo espacio (E6A y E6B de 2018, 2022 y 2023). Sin embargo, Brandt *et al.* (2019) da a conocer que la presencia de las comunidades de esponjas afecta negativamente, no obstante, en este trabajo, no se observó que la permanencia de esponjas en las estaciones limitara el establecimiento de las especies de corales.

Octopus vulgaris y *Oreaster reticulatus* se han determinado como organismos topos, dicha característica se ha determinado por su tamaño, hábitos alimentarios y nivel en la cadena trófica (Scheibling, 1982; Tagliafico *et al.*, 2012; kmjrtf0020g *et al.*, 2024).

CONCLUSIONES

Este trabajo es una línea base sobre la diversidad de macroalgas, pastos marinos e invertebrados en la zona noroeste de la isla Cozumel y su relación con variables

fisicoquímicas (profundidad, temperatura, salinidad y pH) y sedimentarias (textura, contenido de carbono orgánico y carbonatos).

Las variables fisicoquímicas de temperatura y pH presentaron variaciones a través de los años de muestreo, relacionado a las temporadas de colecta y condiciones ambientales (Huracán Michelle).

Los sedimentos que predominaron fueron arena fina, seguido de arena media y arena gruesa. Se encontraron diferencias significativas entre la textura de sedimento (granulo y arena media), mientras que de manera espacial las arenas medias y arenas muy finas presentaron diferencias significativas. Esto se atribuyó a las condiciones ambientales de cada muestreo, las corrientes y por barreras artificiales (muelle).

Se presentaron correlaciones entre las variables sedimentarias de la textura de sedimento arena muy fina/ arena fina con el CO entre los muestreos realizados. Lo que concuerda con la teoría de sorción.

El CO que se obtuvo fue muy similar a lo registrado para zonas costeras, sin embargo, se presentó un valor, aunque no fue significativamente distinto al resto fue el mayor de todos, el cual fue influenciado por la entrada de nutrientes provenientes de lagunas costeras y manglares.

El carbonato de calcio tuvo valores parecidos a los registrados en otras zonas costeras, se consideró que el origen es principalmente biológico proveniente del PNAC.

La riqueza de macroalgas en la zona noroeste de la isla de Cozumel fue de 57 especies donde hubo una mayor riqueza de Chlorophyta, seguido de Rhodophyta y por último Ochrophyta. Lo que es concordante con lo que se había registrado en para otras zonas de la isla en estudios previos sobre la diversidad de algas.

La riqueza de pastos marinos fue de tres especies, lo que es consistente con otros trabajos realizados en la isla.

La riqueza de invertebrados fue de 81 especies; con un mayor número de especies el Phylum Echinodermata, seguido de Cnidaria, Mollusca, Arthropoda, Annelida y por último Porifera. Sin embargo, la diversidad registrada para este trabajo es menor con la reportada para Cozumel.

Se sugiere que hay datos sobre la estancia de especies de macroalgas e invertebrados que realmente podrían no estar presentes en la isla, por lo que dicha riqueza documentada podría estar sobrestimada.

Se registró una mayor riqueza de macroalgas en comparación con lo registrado para el PNAC.

Se obtuvieron nueve nuevos registros de macroalgas para la isla de Cozumel.

Se reconoció la presencia de cuatro especies de macroalgas bioindicadoras de contaminación: *Chaetomorpha gracilis*, *Ulva intestinalis*, *Hypnea spinella* y *Laurencia intricata*.

Mientras que las especies de invertebrados bioindicadoras/biomonitoras fueron en total 12: *Aplysina fistularis*, *Spirobranchius giganteus*, *Hermodice carunculata*,

Octopus vulgaris, *Acanthopleura granulata*, *Balanus sp*, *Leptuca pugilator*, *Oreaster reticulus*, *Eucidaris tribuloides*, *Didema antillarum*, *Lytechinus variegatus* y *Mellita quinquiesperforata*.

Se determinó a las especies *Octopus vulgaris* y *Oreaster reticulatus* como el depredador tope debido a su dieta, tamaño y lugar que ocupa en la cadena trófica.

No se registró ninguna especie de macroalga, pastos o invertebrados marinos que se considere exótica o invasora.

Se observó que la similitud de Jaccard de las macroalgas y pastos marinos a través de los muestreos presentó heterogeneidad, esto es atribuido a las condiciones ambientales y a un posible cambio de fase. Asimismo, entre las estaciones también se observó heterogeneidad, centrándose la diversidad en las estaciones donde se ubican las playas arenosas. Se atribuyó este fenómeno a las condiciones del sustrato, barreras físicas y aportes de nutrientes.

El índice de similitud de Jaccard de invertebrados a través del tiempo se mantuvo mayormente homogénea, mientras que entre las estaciones también fue homogéneo, centrándose mayormente en las estaciones con playas rocosas y sustrato artificial.

El índice de similitud de Jaccard a partir de los tipos de playas (arenosas, rocosas y charcos de marea) expuso un bajo número de especies que comparten los mismos tipos de playa con valores muy bajos de similitud.

La variable de profundidad se relacionó de manera inversa a la gran mayoría de las especies al igual que la temperatura, sin embargo la salinidad se relacionó más con los invertebrados.

Las variables sedimentarias no presentaron una relación significativa con las diferentes especies de macroalgas, pastos marinos e invertebrados.

A través de NMDS, se apreció que las macroalgas bioindicadoras se relacionaron más con la variable de salinidad. La variable de CO se relacionó en mayor medida con *Ulva intestinalis*.

El NMDS mostró que la riqueza de macroalgas, pastos marinos e invertebrados está separada por grupos, donde las estaciones de arenas finas y muy finas presentan la mayor riqueza de macroalgas, mientras que en las estaciones rocosas y/o de sustrato artificial como el muelle presentan la mayor riqueza de invertebrados.

El análisis de componentes principales determinó una distribución de los invertebrados por sus hábitos alimentarios, separando en las estaciones por detritívoros junto con los herbívoros y a los filtradores de partículas con los planctívoros, así mismo se observó que existe cierto equilibrio de especies con distintos hábitos alimentarios en las estaciones que presentan un sustrato artificial.

Se observó que los moluscos tienden a concentrarse en áreas donde la presencia de crustáceos es menor, lo cual se relaciona con la dieta de estos últimos, ya que suelen alimentarse de moluscos y limitan su concurrencia en las zonas donde coexisten.

RECOMENDACIONES

Mantener un monitoreo constante sobre la diversidad y abundancia de las macroalgas, pastos marinos e invertebrados de la zona noroeste de Cozumel, al igual que de las variables de agua y de sedimentos, en especial en aquellas zonas que presentan aportes antropogénicos.

Además, derivado a la identificación de macroalgas bioindicadoras de contaminación, es importante revisar la calidad de agua proveniente de la zona norte donde se encuentra la planta de tratamiento de aguas residuales, que, aunque fue ampliada podría no ser suficiente y por consiguiente podría afectar la calidad de agua y por ende afectar la biodiversidad de la zona.

Se recomienda evitar la construcción de nuevos muelles en Cozumel, por el gran impacto que ocasionan tanto en el aporte de contaminantes en su construcción, como cuando ya están en funcionamiento al modificar el establecimiento de los organismos y la modificación de las condiciones fisicoquímicas y sedimentarias de la zona aledaña.

Aprovechar de manera sustentable y bajo la normativa de ley la zona para el ecoturismo al existir zonas de diversidad muy importantes como las pozas de marea, pastos marinos y los organismos que ahí habitan y no solo centrando todo en la zona del PNAC.

REFERENCIAS

Acosta-Calderón, J. A., Hernández-Rodríguez, C., Mendoza-González, Á. C., & Mateo-Cid, L. E. (2018). Diversity and distribution of *Udotea* genus J.V. Lamouroux

(Chlorophyta, Udoteaceae) in the Yucatan peninsula littoral, Mexico. *Phytotaxa*, 345(3), 179–218. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.345.3.1>

Acosta-Calderón, J. A., Quiroz-González, N., & Mateo-Cid, L. E. (2018). Macroalgas marinas y cambio climático. *Cymbella*, 8(2–3), 53–59.

Adam, T. C., Burkepile, D. E., Ruttenberg, B. I., & Paddack, M. J. (2015). Herbivory and the resilience of Caribbean coral reefs: Knowledge gaps and implications for management. *Marine Ecology Progress Series*, 520, 1–20. <https://doi.org/10.3354/meps11170>

Aguilar-Trujillo, A. C., Okolodkov, Y. B., Merino-Virgilio, F. del C., Osorio-Moreno, I., & Herrera-Silveira, J. A. (2014). Variación espacial de dinoflagelados bentónicos/epifíticos en aguas costeras del norte de Yucatán (agosto de 2011). En A. V. Botello, J. Rendón von Osten, J. Benítez, & G. Gold-Bouchot (Eds.), *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias* (pp. 147–160). UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida.

Airoidi, L. (2003). The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 41, 161–236.

Alcérreca-Huerta, J. C., Callejas, M. E., Ordóñez, S., Gallegos, G., Allmark, M. J., Johnstone, C. M., Marino, I., O'Doherty, T., & Silva, R. (2019a). Resource assessment of the marine current developed in the Cozumel Channel. *Proceedings of the 13th European Wave and Tidal Energy Conference*.

Alcérreca-Huerta, J. C., Encarnacion, J. I., Ordoñez-Sánchez, S., Callejas-Jiménez, M., Barroso, G. G. D., Allmark, M., Mariño-Tapia, I., Casarín, R. S., O'Doherty, T.,

Johnstone, C., & Carrillo, L. (2019b). Energy yield assessment from ocean currents in the insular shelf of Cozumel Island. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(147), 1–18. <https://doi.org/10.3390/jmse7050147>

Alcolado, P. M. (2007). Reading the code of coral reef sponge community composition and structure for environmental bio-monitoring: Some experiences from Cuba. En M. R. Custódio, G. Lôbo-Hajdu, E. Hajdu, & G. Muricy (Eds.), *Porifera research: Biodiversity, innovation and sustainability* (pp. 3–10). Museu Nacional, Rio de Janeiro.

Alvarado, J. J. (2011). Echinoderm diversity in the Caribbean Sea. *Marine Biodiversity*, 41(2), 261–285.

Alvarado, J. J. (2011). Echinoderm diversity in the Caribbean Sea. *Marine Biodiversity*, 41(2), 261–285.

Alvarado, J. J., & Solís-Marín, F. A. (2012). Echinoderm research and diversity in Latin America. En J. J. Alvarado & F. A. Solís-Marín (Eds.), *Echinoderm research and diversity in Latin America* (pp. 1–9). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20051-9_1

Álvarez, F., Villalobos, J. L., Hendrickx, M. E., Escobar-Briones, E., Rodríguez-Almaraz, G., & Campos, E. (2014). Biodiversidad de crustáceos decápodos (Crustacea: Decapoda) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 208–219. <https://doi.org/10.7550/rmb.38758>

- Álvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J. P., Horta-Puga, G., & Iglesias-Prieto, R. (2013). Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific Reports*, 3, 3486. <https://doi.org/10.1038/srep03486>
- Álvarez-Rocha, M., & Ortégón-Aznar, I. (2022). ¿Puede afectar el arribazón de sargazo en el Caribe Mexicano a la cobertura y morfología de *Syringodium filiforme* (Cymodoceaceae)? *Hidrobiológica*, 32(1), 51–55. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2022v32n1/>
- Alves, M. B., Emerenciano, A. A., Bordon, I. C., Silva, J. R. M., & Fávaro, D. I. (2018). Biomonitoring evaluation of some toxic and trace elements in the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816) in a marine environment: Northern coast of São Paulo (Brazil). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 316(2), 781–790.
- Anderson, D. M., Gilbert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4), 704–726. <https://doi.org/10.1007/BF02804901>
- APIQROO. (2024). *Calendario de cruceros para Cozumel*. Recuperado el 3 de mayo de 2024 de <http://servicios.apiqroo.com.mx/programacion/>
- Aranibar, G. R. (2019). Análisis de conglomerados. *Revista Varianza*, 65–84.
- Ardisson, P. L., May Kú, M., Herrera, M., & Arellano, A. (2011). El Sistema Arrecifal Mesoamericano México: Consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261–280.

- Arias-González, J. E., & Briones-Fourzán, P. (2005). Coastal-marine conservation priorities in Mexico: A synthesis based on biodiversity and potential catch data. *Ecological Applications*, 15(5), 1828–1839.
- Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., & Ochoa, J. (2011). Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. *Ciencias Marinas*, 37(4A), 471–492.
- Bae, S., Ubagan, M. D., Shin, S., & Kim, D. G. (2022). Comparación de los patrones de reclutamiento de invertebrados marinos sésiles según las características del sustrato. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1083. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031083>
- Baqueiro-Cárdenas, E. R., Borabe, L., Goldaracena-Islas, C. G., & Rodríguez-Navarro, J. (2007). Los moluscos y la contaminación: Una revisión. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78, 1–7.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). *Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish* (EPA 841-B-99-002). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington, DC.
- Barnes, R. D. (1987). *Zoología de los invertebrados* (5ª ed.). Interamericana McGraw-Hill.
- Barrientos, L. N., Ríos, E., & Esqueda, M. C. (2022). Moluscos (*Mollusca*). En Z. J. Bastida & M. S. García (Eds.), *Invertebrados marinos y costeros del Pacífico sur de México* (pp. 129–190). UMAR.

- Bastida, Z. J., & García, M. S. (2022). La biodiversidad de invertebrados marinos del Pacífico sur de México. En Z. J. Bastida & M. S. García (Eds.), *Invertebrados marinos y costeros del Pacífico sur de México* (pp. 1–20). UMAR.
- Bello, R. P., & Maldonado, G. A. (2014). Importancia y utilidad de los bioindicadores acuáticos. *Biogénesis*, 1(5).
- Bernabéu, A., Medina, R., Vidal, C., & Muñoz Pérez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos.
- Bernabeu, M., Medina, R., Vidal, C., & Muñoz-Pérez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14(3–4).
- Birkart, L. V., & Álvarez-Filip, L. (2025). 2023 global heatwave causes mass mortality of a keystone coral on shallow Western Atlantic reefs. *iScience*, 28(11), 1083.
- Bogdanoff, A. K., Mostowy, J., Peake, J., Layman, C. A., Bermudez, A. B., Gonzalez, C., Hernández, N., Martínez, D. T., Bravo, M. D. R., & Morris, J. A. (2018). A brief description of invasive lionfish (*Pterois* sp.) diet composition in the Arrecifes de Cozumel National Park. *Food Webs*, 17, e00104.
- Bolaños, N., Bourg, A., Gómez, J., & Alvarado, J. J. (2005). Diversidad y abundancia de equinodermos en la laguna arrecifal del Parque Nacional Cahuita, Caribe de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 53(3), 285–290.

- Bonacolta, A. M., Weiler, B. A., Grimes, C. J., Trznadel, M., Vermeij, M. J., Keeling, P. J., & Del Campo, J. (2025). Fireworms are a reservoir and potential vector for coral-infecting apicomplexans. *The ISME Journal*, 19(1), wraf078.
- Bortolus, A., & Iribarne, O. (1999). A population study of the burrowing polychaete *Polydora hoplura* (Annelida: Spionidae) in a SW Atlantic coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(5), 565–573.
- Botello, A. V., Calva, L. G., & Ponce, G. (2001). Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from coastal lagoons of Veracruz State, Gulf of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 67, 889–897.
- Botero-Ángel, A. M. (2017). *Guía ilustrada básica para la identificación de los invertebrados marinos de Isla Fuerte, Bolívar* (Trabajo de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana.
- Boudreau, S. A., & Worm, B. (2012). Ecological role of large benthic decapods in marine ecosystems: A review. *Marine Ecology Progress Series*, 469, 195–213.
- Brandt, M. E., Olinger, L. K., Chaves-Fonnegra, A., Olson, J. B., & Gochfeld, D. J. (2019). Coral recruitment is impacted by the presence of a sponge community. *Marine Biology*, 166(4), 49.
- Brusca, R. C., & Brusca, G. J. (2003). *Invertebrates* (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Brusca, R. C., Giribet, G., & Moore, W. (2023). *Invertebrates* (4th ed.). New York: Oxford University Press

- Burguete, Z. E. A. (2023). Manglares como sumideros de carbono ante el cambio climático. *Ecofronteras*, 27(78), 34–37.
- Busutil, L., & García-Hernández, M. R. (2023). Sponges: Conspicuous inhabitants of the Cuban coral reefs and their potential as bioindicators of contamination. En V. N. Zlatarski, J. K. Reed, S. A. Pomponi, S. Brooke, & S. Farrington (Eds.), *Coral reefs of Cuba* (Coral Reefs of the World, vol. 18). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36719-9_7
- Cabezas-Rabadán, C., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., & Soriano-González, J. (2017). Variabilidad de la línea de costa a partir de imágenes de satélite y su relación con la textura del sedimento. En *Primer Congreso en Ingeniería Geomática. Libro de actas* (pp. 153–161). Universidad Politécnica de València.
- Calcagno, J. A. (Ed.). (2014). *Los invertebrados marinos*. Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Callejas-Jiménez, M. E., Alcérreca-Huerta, J. C., & Carrillo, L. (2021). Assessment of marine energy-biotopes for Cozumel Island's reefs: A resource for tourism and renewable ocean energy. *Ocean & Coastal Management*, 210, 105701.
- Calva-Benítez, L. G. (2002a). Hábitos alimentarios de algunos equinodermos. Parte 1. Estrellas de mar y estrellas serpiente. *Contactos*, 46, 59–68.
- Calva-Benítez, L. G. (2002b). Hábitos alimentarios de algunos equinodermos. Parte 2. Erizos de mar y pepinos de mar. *Contactos*, 47, 54–63.

- Calva-Benítez, L. G., & Torres-Alvarado, R. (2008). Macroalgas y pasto marino, útiles bioindicadores de contaminación por hidrocarburos fósiles en sistemas acuáticos. *Contactos*, 68, 38–46.
- Calva-Benítez, L. G., & Torres-Alvarado, R. (2011). Carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México. *Universidad y Ciencia*, 27(2), 133–144.
- Calva-Benítez, L. G., Méndez-Montaña, M. R., Torres-Alvarado, R., Varona-Cordero, F., & Trejo-Aguilar, G. M. (2014). Hidrocarburos aromáticos policíclicos y carbono orgánico en sedimentos de la Costa Maya sur. En A. V. Botello, J. Rendón von Osten, J. A. Benítez, & G. Gold-Bouchot (Eds.), *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. UAC, UNAM-CINVESTAV, Unidad Mérida.
- Calva-Benítez, L. G., Pérez Rojas, A., & Márquez García, A. Z. (2006). Contenido de carbono orgánico y características texturales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiológica*, 16(2), 127–135.
- Campos-Vázquez, C. (2000). Crustáceos asociados a macroalgas en Bajo Pepito, Isla Mujeres, Caribe mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 48(2–3), 361–364.
- Campos-Vázquez, C., Carrera-Parra, L. F., González, N. E., & Salazar-Vallejo, S. I. (1999). Criptofauna en rocas de Punta Nizuc, Caribe mexicano y su utilidad como biomonitor potencial. *Revista de Biología Tropical*, 47(4), 799–808.

- Carballo, J. L., Gómez, P., & Cruz-Barraza, J. A. (2014). Biodiversidad de Porifera en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 143–153.
- Carlos, C. V., & Rodolfo, R. N. (s.f.). Caracterización de hábitats bentónicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel: Una comparación de 11 años. Asociación de Oceanólogos de México, A.C.
- Carlton, J. T., Chapman, J. W., Geller, J. B., Miller, J. A., Carlton, D. A., McCuller, M. I., ... & Ruiz, G. M. (2017). Tsunami-driven rafting: Transoceanic species dispersal and implications for marine biogeography. *Science*, 357(6358), 1402–1406.
- Carranza-Ramírez, A., Calva-Benítez, L. G., & Núñez-Resendiz, M. L. (2023). Taxonomic composition and substrate affinity of conspicuous marine macroalgae of the Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 130.
- Carriquiry, J. D., Villaescusa, J., Cupul, A. M., & Rodríguez, F. Z. (2017). Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación con la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Segunda etapa. *Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. GM006*. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Ciudad de México.
- Castillo-Rodríguez, Z. (2014). Biodiversidad de moluscos marinos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(Suppl.), S419–S430.
<https://doi.org/10.7550/rmb.33003>

- Castro-Sanguino, C., Bozec, Y. M., & Mumby, P. J. (2020). Dinámica de la producción de sedimentos carbonatados por *Halimeda*: Implicaciones para los presupuestos carbonatados de los arrecifes. *Marine Ecology Progress Series*, 639, 91–106. <https://doi.org/10.3354/meps13265>
- Ceccherelli, G., Pinna, S., Cusseddu, V., & Bulleri, F. (2014). The role of disturbance in promoting the spread of the invasive seaweed *Caulerpa racemosa* in seagrass meadows. *Biological Invasions*, 16, 2737–2745.
- Celaya-Hernández, E. V., Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A., Durán-González, A. D. L. L., & Rodríguez, T. R. (2008). Asociación a sustratos de los erizos regulares (Echinodermata: Echinoidea) en la laguna arrecifal de Isla Verde, Veracruz, México. *Revista de Biología Tropical*, 56(3), 281–295.
- Cetz, N. N. P., Espinoza, J., Sentíes, A., & Quan, L. I. (2008). Nuevos registros de macroalgas para el Atlántico mexicano y riqueza florística del Caribe mexicano. *Hidrobiológica*, 18(1), 11–19.
- Charteris, M. (2017). *Caribbean reef life: A field guide for divers* (4th ed.). Mickey Charteris.
- Chávez-López, S. (2023). Franja costera y sus ecosistemas: problemática e importancia. *Recursos Naturales y Sociedad*, 9(1), 49–63.
- Chávez, J. F. V., Díaz, M. E., & Arana, D. A. (2014). Abundancia y diversidad larval de gasterópodos en el Caribe Mexicano en relación con la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 223–230.

- Chávez, V., Uribe, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., ... & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic *Sargassum* spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities. *Water*, 12(10), 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Chierici, M., & Fransson, A. (2009). Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: Undersaturation in freshwater influenced shelves. *Biogeosciences*, 6(11), 2421–2432.
- Chuc-Contreras, A., Ortegón-Aznar, I., Tuyub Mota, A., & Suárez Salazar, J. (2012). Cambio de fase coral-algas en el arrecife de coral de Mahahual, en el Caribe Mexicano. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 64, 28–31.
- Cifuentes, J. L., Torres, P., & Frías, M. (1986). *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: Oceanografía, geología y oceanografía química*. Fondo de Cultura Económica.
- Cinner, J. E., Huchery, C., Darling, E. S., Humphries, A. T., Graham, N. A., Hicks, C. C., & McClanahan, T. R. (2013). Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PLOS ONE*, 8(9), e74321.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). *Programa de manejo: Área de protección de flora y fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel* (1ª ed.). México: CONANP.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2019). *Programa de manejo: Reserva de la biosfera Caribe Mexicano* (1ª ed.). México: CONANP.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Ley federal de derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2021*. México.
- Contreras, J. E., & Velázquez, R. C. (2015). Comunidades de algas como bioindicadores de calidad ambiental. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 7(1), 45–58.
- Cowles, A., Hewitt, J. E., & Taylor, R. B. (2009). Density, biomass and productivity of small mobile invertebrates in a wide range of coastal habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 384, 175–185.
- Cresswell, A. K., et al. (2023). Coral reef state influences resilience to acute climate-mediated disturbances. *Global Ecology and Biogeography*, 32(1), 4–16.
- Cruz, V. C. (2017). *Variación del paisaje bentónico y efecto del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) en un periodo de 11 años* (Tesis de Maestría en Ciencias). SISAL, UNAM, Yucatán, México.
- Cruz, V. C., & Nieto, R. (2018). Caracterización de hábitats bentónicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel: Una comparación de 11 años. En O. L. F. Navarro, A. Monreal, & C. Peynador (Eds.), *Libro conmemorativo de Oceanología: Compendio UNAM-ASOCEAN* (pp. 74–77). UNAM-ASOCEAN.
- Cuevas-Sánchez, E., Dreckmann, K. M., Núñez-Resendiz, M. L., & Senties, A. (2022). Listado sistemático actualizado de las macroalgas estuarinas de Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana*, 129, e2105.
<https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2105>

- Cupul, M. L. A., Mössö, C., Sierra, J., Martí, E., Ferman, J., Rodilla, M., González, J., & Sánchez, A. (2006). Caracterización y patrones de distribución de los sedimentos superficiales en Bahía Cullera, España. *Ciencias Marinas*, 32(4), 617–629.
- Cyronak, T., Takeshita, Y., Courtney, T. A., DeCarlo, E. H., Eyre, B. D., Kline, D. I., Martz, T., Page, H., Price, N. N., Smith, J., Stoltenberg, L., Tresguerres, M., & Andersson, A. J. (2020). Diel temperature and pH variability scale with depth across diverse coral reef habitats. *Limnology and Oceanography Letters*, 5, 193–203.
- da Silva, E. T., Klumpp, D., & Ridd, M. (2009). The barnacle *Balanus amphitrite* as a bioindicator for Cd: Development and application of a simulation model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(2), 171–179.
- da Silva-Silvestre, L., Serrão, C., Mataribu, B., Marinho, G., Aguiar, M. G., & Marques-Santos, L. F. (2025). Embryonic and larval developmental patterns of the sand dollar *Mellita quinquiesperforata*: Insights into early life stages. *Invertebrate Biology*, 144(1). <https://doi.org/10.71161/ivb.144.1.2024.00003>
- Dauvin, J. C., & Desroy, N. (2000). The relationship between sedimentary pigments and some characteristics of benthic communities: A new approach to environmental interpretation. *Journal of Sea Research*, 44(1–2), 101–108.
- David-Colón, J. D., & Marín-Casas, D. H. (2020). Poríferos asociados a rompeolas en el departamento de Sucre (Caribe colombiano). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 996–1007. <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1038>

Dawes, C. J. (1986). *Botánica marina*. Limusa.

Dawes, C. J. (1998). *Marine botany* (2nd ed.). Wiley.

Dayton, P. K. (1985). Ecology of kelp communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 215–245.

de la Cruz-Francisco, V. (2025). Esponjas marinas (Porifera: Demospongiae) de los espigones de Tuxpan, Veracruz, con nuevos registros para México. *Novitates Caribaea*, 25, 1–20.

De La Lanza, E. G., & Hernández, S. (2014). Organismos acuáticos como bioindicadores de cambios ambientales: Características, elección, interpretación, monitoreo, ventajas y desventajas. En Z. C. González, A. Vallarino, J. C. Pérez, & A. M. Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 41–64). ECOSUR, INECC.

de Vasconcelos, E. R. T. P. P., Vasconcelos, J. B., Reis, T. N. D. V., Cocentino, A. D. L. M., Mallea, A. J. A., Martins, G. M., ... & Fujii, M. T. (2019). Macroalgal responses to coastal urbanization: Relative abundance of indicator species. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 893–903.

Dean, W. E. Jr. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 242–248.

del Socorro García-Madrigal, M., Villalobos-Hiriart, J. L., Álvarez, F., & Bastida-Zavala, R. (2012). Estado del conocimiento de los crustáceos de México. *Ciencia y Mar*, 16(46), 43–62.

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929.

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929.

Díaz, R. S., Aguirre, A., & Gazca, M. (2019). Biodiversidad de los peces en el Sistema Arrecifal Mesoamericano, Caribe Mexicano. En A. E. Rivera, P. Sánchez, & J. Gutiérrez (Eds.), *Tópicos de agenda para la sostenibilidad de costas y mares mexicanos* (pp. 117–129). Universidad Autónoma de Campeche, Red RIOOMAR.

Díaz-Merlano, J. M., Gómez-López, D. I., Barrios-Suárez, L. M., & Montoya-Maya, P. (2003). Composición y distribución de las praderas de pastos marinos en Colombia. En J. M. Díaz-Merlano, L. M. Barrios-Suárez, & D. I. Gómez-López (Eds.), *Las praderas de pastos marinos en Colombia: Estructura y distribución de un ecosistema estratégico* (pp. 25–65). Santa Marta, Colombia: INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 10.

DiNuzzo, E. R., Anderson III, L., Walker, A., Sasso, H. K., Christensen, B., & Griffen, B. D. (2020). Human influences on male waving behavior in the fiddler crab *Leptuca pugilator*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 53(2), 43–57.

- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192.
- Duarte, C. M., & Cebrián, J. (1996). The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography*, 41(8), 1758–1766.
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4, 100.
- Durán-González, A., Laguarda-Figueras, A., Solís-Marín, F. A., & Gracia, A. (2024). Crinoidea y Asteroidea (Echinodermata) del talud de la península de Yucatán, de la Colección Nacional de Equinodermos de México. *Revista de Biología Tropical*, 72.
- Elías, R., Villamar, F., Laverde Castillo, J. J., Brauko, K. M., Araki Braga, M., Cunha Lana, P. D., ... & Cárdenas Calle, M. (2021). Polychaetes as biological indicators in Latin America and the Caribbean. *Marine and Fishery Sciences*, 34(1), 37–107.
- Escárcega-Quiroga Pastor, A., Granados-Barba, A., González-Gándara, C., Epherra, L., Marín-Hernández, M., & Crespi-Abril, A. (2019). Variación fenotípica del erizo *Eucidaris tribuloides* (Cidaroida: Cidaridae) en el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1146–1159.
- Estrada-Saldívar, N., Quiroga-García, B. A., Pérez-Cervantes, E., Rivera-Garibay, O. O., & Álvarez-Filip, L. (2021). Effects of the stony coral tissue loss disease outbreak on coral communities and the benthic composition of Cozumel reefs. *Frontiers in Marine Science*, 8, 632777.

- Falcón-Vidal, D. A., Rivas-Acuña, M. G., & Piñón-Gimate, A. (2019). Composición y fluctuación estacional de especies formadoras de florecimientos macroalgales en la laguna costera El Carmen, Cárdenas, Tabasco, Golfo de México. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 11(2), 99–118.
- Fauchald, O. K., & Jumars, P. A. (1979). The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. En *Ecological Studies*, Vol. 17 (pp. 193–284). Aberdeen University Press.
- Felder, D. L., Álvarez, F., Goy, J. W., & Lemaitre, R. (2009). Decapoda (Crustacea) of the Gulf of Mexico, with comments on the Amphionidacea. En D. L. Felder & D. K. Camp (Eds.), *Gulf of Mexico – Its origins, waters, and biota: Biodiversity* (pp. 1019–1104). Texas A&M University Press.
- Fernández Rodríguez, A. G., Rivera Villagrán, I. E., & Pacheco Cocom, M. Y. (2018). Turismo de cruceros en Cozumel: Un enfoque derivado de sus impactos asociados a la sostenibilidad. *Tla-melaua*, 12(45), 152–172.
- Fernández, J., & Jiménez, M. (2006). Estructura de la comunidad de moluscos y relaciones tróficas en el litoral rocoso del estado Sucre, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 54, 121–130.
- Fernández, M. O., Navarrete, S. A., & Marques, A. C. (2014). Temporal variation in richness and composition of recruits in a diverse cnidarian assemblage of subtropical Brazil. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 460, 144–152.

- Fernández, M. O., Navarrete, S. A., & Marques, A. C. (2014). Temporal variation in richness and composition of recruits in a diverse cnidarian assemblage of subtropical Brazil. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 460, 144–152.
- Fisher, R., O’Leary, R. A., Low-Choy, S., Mengersen, K., Knowlton, N., Brainard, R. E., & Caley, M. J. (2015). Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates. *Current Biology*, 25(4), 500–505.
- Flores-Ramírez, M., Chapa-Balcorta, C., López-Pérez, R. A., Leal-Acosta, M. L., & García-Burciaga, H. (2021). Distribución espacial del estado de saturación de aragonita y pH durante diciembre de 2020 en Isla La Blanca, Oaxaca. En J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños, & P. Ibarra (Eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2021* (pp. 292–297). Programa Mexicano del Carbono, ITESM.
- Flower, J., Ortiz, J. C., Chollett, I., Abdullah, S., Castro, C., Hock, K., & Mumby, P. J. (2017). Interpreting coral reef monitoring data: A guide for improved management decisions. *Ecological Indicators*, 72, 848–869.
- Fonseca, M. S., & Kenworthy, W. J. (1987). Effects of current on photosynthesis and distribution of seagrasses. *Aquatic Botany*, 27(1), 59–78.
- Fragoso, K. V. V. (2021). El problema del aumento del sargazo en las costas del Caribe mexicano. *Universciencia*, 19(58).

- Fu, Q., Chen, L., Sun, D., Wang, J., Chen, J., Li, B., & Chen, L. (2025). Hydrological connectivity induces changes in macrobenthos functional feeding groups in a typical tidal creek system of the Yellow River Delta. *Wetlands*, 45(5), 45.
- Fuentes, S. A., Gallegos, M. E., & Mandujano, M. C. (2014). Demografía de *Caulerpa paspaloides* var. *wudermannii* (Bryopsidales: Caulerpaceae) en la zona costera de Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 729–741.
- Gaitán-Espitia, J. D. (2008). Estructura de la comunidad del Phylum Echinodermata en aguas someras de la bahía de Taganga, Caribe colombiano. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 11(1), 85–93.
- Galeana-Rebolledo, L., Flores-Garza, R., Torreblanca-Ramírez, C., García-Ibáñez, S., Flores-Rodríguez, P., & López-Rojas, V. I. (2012). Biocenosis de *Bivalvia* y *Polyplacophora* del intermareal rocoso en playa Tlacopanocha, Acapulco, Guerrero, México. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(4), 943–954.
- Gallegos-Martínez, M. E. (2010). Efectos del cambio climático sobre las praderas de pastos marinos. En A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 189–210). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Gándara, C. G., Arellano, M. C., Barradas, C. D., Solís, A. S., & Muñoz, A. D. J. B. (2007). Macroalgas asociadas a cuatro hábitats del arrecife Tuxpan, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 7(1), 252–257.

- García, C. F., & Núñez, J. C. (2009). Propagación del alga verde *Caulerpa sertularioides* en el Pacífico de Costa Rica. *Biocenosis*, 22(1–2).
- García, F., Palacio, C., & García, U. (2012). Distribución vertical de temperatura y salinidad en el área costera de Santa Marta (Colombia). *Dyna*, 79(171), 232–238.
- García, M. Y., Heredia, G., Guzmán, J., Valenzuela, R., & Raymundo, T. (2021). Hongos asociados al mangle rojo *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae) en la Reserva de la Biosfera Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 128, e1880.
- García, M., Gómez, S., Gil, N., & Espinoza, Y. (2013). Macroalgas marinas del sector Puerto Cruz del estado Vargas, Venezuela. *Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 52(2).
- García-Cubas, A., & Reguero, M. (2004). *Catálogo ilustrado de moluscos gasterópodos del Golfo de México y Mar Caribe*. UNAM.
- García-Madrigal, D. S. M., Villalobos-Hiriart, J. L., Álvarez, F., & Bastida-Zavala, R. (2012). Estado del conocimiento de los crustáceos de México. *Ciencia y Mar*, 16(46), 43–62.
- Garduño-Solórzano, G., Godínez-Ortega, J. L., & Ortega, M. M. (2005). Distribución geográfica y afinidad por el sustrato de las algas verdes (Chlorophyceae) bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe. *Botanical Sciences*, 76, 61–78.

- Gattuso, J. P., Allemand, D., & Frankignoulle, M. (1999). Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral reefs: A review on interactions and control by carbonate chemistry. *American Zoologist*, 39(1), 160–183.
- Gaudette, H., Flight, W., Toner, L., & Folger, D. (1974). An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 249–253.
- Genzáno, G. N., Schiariti, A., & Mianzan, H. W. (2014). Cnidaria. En J. A. Calcagno (Ed.), *Los invertebrados marinos* (pp. 67–86). Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Giménez, J., & Torroglosa, M. E. (2014). Gastrópoda. En J. A. Calcagno (Ed.), *Los invertebrados marinos* (pp. 133–146). Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Glasby, T. M. (2013). *Caulerpa taxifolia* in seagrass meadows: Killer or opportunistic weed? *Biological Invasions*, 15, 1017–1035.
- Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2025). Con visión de futuro, Mara Lezama fortalece infraestructura sanitaria en Cozumel al duplicar la capacidad de la planta “San Miguelito”. Recuperado el 20 de febrero de 2026 de: <https://cgc.qroo.gob.mx/con-vision-de-futuro-mara-lezama-fortalece-infraestructura-sanitaria-en-cozumel-al-duplicar-la-capacidad-de-la-planta-san-miguelito/>

- Godefroy, N., Le Goff, E., Martinand-Mari, C., Belkhir, K., Vacelet, J., & Baghdiguian, S. (2019). Sponge digestive system diversity and evolution: From filter feeding to carnivory. *Cell and Tissue Research*, 377(3), 341–351.
- Goldberg, W. M. (2018). Coral food, feeding, nutrition, and secretion: A review. En *Marine organisms as model systems in biology and medicine* (pp. 377–421). Springer.
- Gómez, P., & Calderón-Gutiérrez, F. (2020). Anchialine cave-dwelling sponge fauna (Porifera) from La Quebrada, Mexico, with the description of the first Mexican stygobiont sponges. *Zootaxa*, 4803(1), 125–151. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4803.1.7>
- Gómez-Petersen, P., Tortolero-Langarica, J. D. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., Ortiz, M., Ríos-Jara, E., & Rodríguez-Zaragoza, F. A. (2023). Evaluación del sustrato natural y artificial en la restauración de arrecifes de coral en el Parque Nacional Isla Isabel, México. *Revista de Biología Tropical*, 71(S1).
- Gondim, A. I., Alonso, C., Dias, T. L., Manso, C. L., & Christoffersen, M. L. (2013). A taxonomic guide to the brittle-stars (Echinodermata, Ophiuroidea) from the State of Paraíba continental shelf, Northeastern Brazil. *ZooKeys*, 307, 45.
- Gondim, A. I., Mota, E. L. S., Lafite, N. F., Christoffersen, M. L., & Dias, T. L. P. (2022). Current knowledge of echinoderms (Echinodermata) from the coast of Paraíba, northeastern Brazil. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93.
- González, A. C. M., & Mateo, L. E. (1992). Algas marinas bentónicas de Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 19, 37–61.

- González, A., Torruco, D., & Torruco, A. D. (2017). Las playas arenosas de Quintana Roo, México: La diversidad de su fauna intermareal. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(2), 361–373.
- González, E., & Ramírez, P. (2018). Efectos de la sedimentación costera en la profundidad marina en el Golfo de México. *Revista de Oceanografía y Climatología*, 25(4), 120–132.
- González, L. W., Eslava, N., Guevara, F., & Troccoli, L. (2015). Biología y pesquería del pulpo *Octopus vulgaris* (Octopoda: Octopodidae) en las costas del estado Nueva Esparta, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 63(2), 427–442.
- González, S. A., Torruco, D., & Torruco, A. D. (2018). Biodiversidad de macroalgas en arrecifes coralinos de la Sonda de Campeche, el Caribe Mexicano y Belice. *Gayana Botánica*, 75(1), 501–511.
- González, S. A., Torruco, D., & Torruco, A. D. (2021). Distribución de macroalgas e invertebrados marinos en la laguna arrecifal del Arrecife de Banco Chinchorro, Quintana Roo, México. *Intropica*, 16(1), 83–93.
- González, V. N. (2008). Quitones comunes (Mollusca: Polyplacophora). En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 215–224). Universidad de Quintana Roo.
- González-Delgado, S., Lozano-Bilbao, E., Hardisson, A., Paz, S., González-Weller, D., Rubio, C., & Gutiérrez, Á. J. (2024). Metal concentrations in echinoderms: Assessing bioindicator potential and ecological implications. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116619.

- González-Etchebehere, L., Kruk, C., Scarabino, F., Laporta, M., Zabaleta, M., González, L., & Vélez-Rubio, G. (2017). Comunidades de macroalgas en puntas rocosas de la costa de Rocha, Uruguay. *Innotec*, 14, 17–30.
- González-Muñoz, R., Simoes, N., Sanchez-Rodriguez, J., Rodriguez, E., & Segura-Puertas, L. (2012). First inventory of sea anemones (Cnidaria: Actiniaria) of the Mexican Caribbean. *Zootaxa*, 3556(1), 1–38.
- González-Muñoz, R., Hernández-Ortiz, C., Garese, A., Simões, N., & Acuña, F. H. (2018). Cnidae sizes in the two morphotypes of the giant Caribbean anemone *Condylactis gigantea* (Actiniaria: Actiniidae). *Revista de Biología Tropical*, 66(3), 1055–1064.
- González-Muñoz, R., Simões, N., Sánchez-Rodríguez, J., Rodríguez, E., & Segura-Puertas, L. (2012). First inventory of sea anemones (Cnidaria: Actiniaria) of the Mexican Caribbean. *Zootaxa*, 3556(1), 1–38.
- González-Murcia, S., Erdmann, S., & Alvarado-Larios, R. (2020). Is this rock pool suitable habitat? Fish diversity in intertidal rock pools of El Zonte, El Salvador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913099. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3099>
- González-Solís, A., & Torruco, D. (2015). Fauna y flora intermareal de las costas rocosas de Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 943–958.
- González-Solís, A., Torruco, D., & Torruco-González, Á. D. (2018). Biodiversidad de macroalgas en arrecifes coralinos de la Sonda de Campeche, el Caribe Mexicano y Belice. *Gayana Botánica*, 75(1), 501–511.

- González-Solís, A., Torruco, D., & Torruco-González, Á. D. (2021). Distribución de macroalgas e invertebrados bentónicos en la laguna arrecifal del Arrecife de Banco Chinchorro, Quintana Roo, México. *Intropica*, 16(1), 83–95.
- Granados-Barba, A., Solís-Weiss, V., Tovar-Hernández, M. A., & Ochoa-Rivera, V. (2003). Distribution and diversity of the Syllidae (Annelida: Polychaeta) from the Mexican Gulf of Mexico and Caribbean. En *Advances in Polychaete Research: Proceedings of the 7th International Polychaete Conference* (pp. 337–345). Springer.
- Green, E. P., Short, F. T., Centre mondial de surveillance continue de la conservation de la nature, & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2003). *World atlas of seagrasses* (Vol. 298). University of California Press.
- Guilarte, B. A. J., Rodríguez, R. J. C., Velázquez, A. J., & Martínez, E. (2013). Distribución espacial y temporal de macroalgas bentónicas en la bahía de Boca del Río, isla de Margarita, Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 36(2), 239–260.
- Hall, M. O., Bell, S. S., Furman, B. T., & Durako, M. J. (2021). Natural recovery of a marine foundation species emerges decades after landscape-scale mortality. *Scientific Reports*, 11(1), 6973.
- Harley, C. D., Hughes, A. R., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J., Thornber, C. S., ... & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241.

- Harmelin, J. G., & Vacelet, J. (1997). Clues to deep-sea biodiversity in a nearshore cave. *Biodiversity and Conservation*, 6(1), 1–10.
- Heink, U., & Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10(3), 584–593.
- Helmuth, B., Harley, C. D. G., Halpin, P. M., O'Donnell, M., Hofmann, G. E., & Blanchette, C. A. (2002). Climate change and latitudinal patterns of intertidal thermal stress. *Science*, 298(5595), 1015–1017.
- Hendy, I. W., Woolford, K., Vincent-Piper, A., Burt, O., Schaefer, M., Cragg, S. M., Sanchez-Navarro, P., & Ragazzola, F. (2021). Climate-driven golden tides are reshaping coastal communities in Quintana Roo, Mexico. *Climate Change Ecology*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100033>
- Hernández, A., & Muñoz, P. (2019). Dinámica de la salinidad en las costas del Caribe mexicano y su relación con el clima. *Revista Mexicana de Oceanografía*, 23(3), 157–174.
- Hernández, C., Álvarez, F., & Villalobos, J. L. (2010). Crustáceos asociados a sustrato duro en la zona intermareal de Montepío, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(Suppl.), S147–S151.
- Hernández, R., & Álvarez, F. (2019). Molluscs from the Puerto Morelos Reef National Park, Quintana Roo, Mexico; new records for the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902896.

Hernández, R., & Rodríguez, C. (2020). Cambios en la temperatura del mar en el Caribe Mexicano: Un análisis de las últimas décadas. *Revista Mexicana de Oceanografía*, 28(4), 99–115.

Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218, 517–528.

Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda, S. M., Mendoza-Martínez, J. E., Medina-Gómez, I., Ramírez-Ramírez, J., Sandoval-Gil, J. M., & Camacho-Ibar, V. F. (2019). Pastos marinos. En *Estado del ciclo del carbono: Agenda azul y verde* (pp. 150–177).

Hickman, C., Roberts, L. S., Keen, S. L., Larson, A., Anson, H. I., & Eisenhour, D. J. (2009). *Principios integrales de zoología* (p. 917). McGraw-Hill.

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., ... & Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857), 1737–1742.

Hofmann, G. E., Smith, J. E., Johnson, K. S., Send, U., Levin, L. A., Micheli, F., ... & Martz, T. R. (2011). High-frequency dynamics of ocean pH: A multi-ecosystem comparison. *PLOS ONE*, 6(12), e28983.

Horta, P. G., Álvarez, L., Cabral, R., López, A., Ortiz, L., Pérez, H., & Reyes, H. (2019). Coastal coral reefs in Mexico. En A. V. Botello, S. Villanueva, & J. Gutiérrez

(Coords.), *Costas y mares mexicanos: Contaminación, impactos, vulnerabilidad y cambio climático* (pp. 329–366). UNAM, UAC.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (Eds.). (2014). *Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Conservation International, IOC-UNESCO, IUCN. Arlington, VA.

Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B., ... & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82–90.

Hughes, T. P., Graham, N. A., Jackson, J. B., Mumby, P. J., & Steneck, R. S. (2010). Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(11), 633–642.

Humann, P., & DeLoach, N. (2013a). *Reef creature identification: Florida, Caribbean, Bahamas*. New World Publications.

Humann, P., & DeLoach, N. (2013b). *Reef coral identification: Florida, Caribbean, Bahamas*. New World Publications.

Ramsar. (2009). *Manglares y humedales del norte de Isla Cozumel*. Recuperado el 16 de diciembre de 2022 de: <https://rsis Ramsar.org/es/ris/1921?language=es>

Instituto Nacional de Ecología (INECOL). (1998). *Programa de manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo* (pp. 9–35). México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Conociendo Quintana Roo*. Recuperado el 7 de enero de 2022 de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/QUINTANA_ROO.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Producto Interno Bruto por entidad federativa 2016*. México: INEGI.

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I. M., & Martínez, L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: Origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), 486–507.

Jordán-Dahlgren, E. (2008). Arrecifes coralinos. En L. M. Mejía-Ortiz (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 163–186). Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés.

Jordán-Dahlgren, E., & Mejía, L. M. (2008). Arrecifes coralinos de Cozumel. En L. M. Mejía-Ortiz (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel*. Plaza y Valdés–UQROO.

Kaas, P., & Van Belle, R. A. (1985). *Monograph of living chitons (Mollusca: Polyplacophora). Volume 2. Suborder Ischnochitonina. Ischnochitonidae: Schizoplacinae, Callochitoninae y Lepidochitoninae*. E. J. Brill / W. Backhuys.

Kaiser, M. J., Attrill, M. A., Jennings, S., Thomas, D. N., Barnes, D. K. A., Brierley, A. S., Hiddink, J. G., Kaartokallio, H., Polunin, N. V. C., & Raffaelli, D. G. (2011). *Marine*

ecology: Processes, systems, and impacts (2nd ed.). Oxford University Alvarado, J. J. (2011). Echinoderm diversity in the Caribbean Sea. *Marine Biodiversity*, 41, 261–285.

Kamer, K., Schiff, K. C., Kenninson, R. L., & Fong, P. (2002). Macroalgal nutrient dynamics in Upper Newport Bay. *Southern California Coastal Water Research Project. Technical Report*, 365, 98.

Ketchum, B. H. (1983). Nutrient limitation of marine primary production. En *Marine ecology: A comprehensive, integrated treatise on life in oceans and coastal waters*. Academic Press.

Laguarda-Figueras, A., Solís, F. A., Durán, A., Ahearn, C. G., Sánchez, B. E., & Torres, J. (2005). Equinodermos (Echinodermata) del Caribe Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 53(3), 109–122.

Laguarda-Figueras, A., Torres, J., Solís, F. A., Mata, E., Durán, A., & Abreu, M. (2002). Los asteroideos (Echinodermata: Asteroidea) del Caribe Mexicano: Incluyendo comentarios sobre su zoogeografía. *Avicennia*, 15, 1–8.

Lam, V. Y., Doropoulos, C., & Mumby, P. J. (2017). The influence of resilience-based management on coral reef monitoring: A systematic review. *PLOS ONE*, 12(2), e0172064.

Lara-Rodríguez, R., Velásquez-Arenas, R., Troccoli-Ghinaglia, L., Hernández, D., & Lemus, M. (2015). Variación temporal de las variables físico-químicas y biomasa

fitoplanctónica en aguas superficiales de la zona costera de Chacopata, NE Venezuela (Mar Caribe). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 50(2), 367–373.

Lazcano-Pérez, J. F., Salazar Campos, Z., & González Márquez, H. (2020). Anémonas, corales y medusas: Los cnidarios y su importancia médica. *Revista Digital Universitaria*, 21(2).

Leal, M. C., Puga, J., Serôdio, J., Gomes, N. C. M., Calado, R., & Mendes, C. R. (2014). Effects of temperature and copper on the physiological responses of the brown macroalga *Padina pavonica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 101, 133–140.

León, A. D., & Núñez, M. L. (2017). *Géneros de algas marinas tropicales de México: II Algas pardas*. UNAM.

León, V., Paulmier, A., Ledesma Rivera, J., Croot, P., Graco, M., Flores Gonzáles, G., ... & Tenorio, J. (2011). pH como un trazador de la variabilidad biogeoquímica en el Sistema de Humboldt. *Revista Peruana de Biología*, 18(1), 25–34.

Leyte, V. J., González, L. A., Gutiérrez, O., Márquez, L., & Alfonso, T. (2019). Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados. *Revista Cubana de Química*, 31(2).

- Littler, D. S., & Littler, M. M. (2000). *Caribbean reef plants: An identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico*. OffShore Graphics.
- Liu, Z., Wei, J., & Zheng, Y. (2016). Salinity-induced ecosystem shifts in a subtropical coastal wetland. *Wetlands*, 36(1), 119–130.
- Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (2000). *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge University Press.
- Lobban, C. S., Harrison, P. J., & Duncan, M. J. (1985). *The physiological ecology of seaweeds*. Cambridge University Press.
- López, P. R. A. (2003). Los corales: ¿Piedras, plantas o animales? *Ciencia Ergo Sum*, 10(1), 115–118.
- Loreto-Viruel, R. M., García, G. B., & Bezaury, J. C. (2017). Caracterización de los arrecifes coralinos de Isla Cozumel, Quintana Roo, México. *Amigos de Sian Ka'an*, 7, 11–40.
- Lot, H. A., & Ramírez, P. (2008). Vegetación. En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 115–120). Universidad de Quintana Roo.
- Lozano, A. E., Guevara, D., & Briones, P. (2007). La comunidad de peces arrecifales del Parque Chankanaab. En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 309–323). Universidad de Quintana Roo.

Lozano, G. R., Rodríguez, J. H., Barrientos, L., Venegas, C. S., Correa, A., & Correa, A. (2020). Nuevos registros de moluscos (Gasteropoda, Bivalvia) de la Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 30(3), 243–250.

Lozano-Guzmán, R. I., Rodríguez-Castro, J. H., Barrientos-Lozano, L., Venegas-Barrera, C. S., Correa-Gutiérrez, A., & Correa-Sandoval, A. (2020). Nuevos registros de moluscos (Gastropoda, Bivalvia) de la isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 30(3), 243–250.

Luna, C. F. B., Gómez-Otamend, E., Tamariz-Flores, J. V., & Castelán-Vega, R. (2023). Bioindicadores como herramientas para la evaluación de la contaminación ambiental. *RD-ICUAP*, 202–207.

Maas, V. M., & Bahena, H. (2008). Esponjas marinas (Porifera: Demospongiae). En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 151–163). Universidad de Quintana Roo.

Mansilla, A., & Alveal, K. (2004). Generalidades sobre las macroalgas. En I. C. Werlinger (Ed.), *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos* (Tomo I). Gobierno de Chile.

Mansilla, A., & Alveal, K. (2005). Generalidades sobre las macroalgas. En C. Werlinger (Ed.), *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos* (Tomo I, pp. 347–360). Universidad de Concepción.

- Markert, B., Wünschmann, S., De Marco, S. G., Gomez, N., Barral, M. P., & Marcovecchio, J. E. (2021). El uso de bioindicadores y biomonitores como evaluadores ambientales en arroyos: Definiciones, estrategias y aplicaciones. *FASTA*, 145–174.
- Markert, B., Wünschmann, S., Marcovecchio, J., & De Marco, S. (2013). Bioindicadores y biomonitores: Definiciones, estrategias y aplicaciones. *Procesos Químicos en Estuarios*, 1.
- Márquez-Borrás, F., Solís-Marín, F. A., Bribiesca-Contreras, G., & Laguarda-Figueras, A. (2016). First record of *Ophiura ljunmani* (Echinodermata: Ophiuroidea) from an anchialine cave in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 1127–1130.
- Marshall, A. J., & Williams, W. D. (1985). *Zoología: Invertebrados* (7ª ed.). Reverté.
- Mateo-Cid, L. E., & Mendoza-González, A. C. (1991). Algas marinas bénticas de la Isla Cozumel, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 16, 57–87.
- Mateo-Cid, L., & Mendoza-González, A. (1997). Algas marinas bénticas de la Isla de Cozumel. *Acta Botánica Mexicana*, 16, 57–87.
- Mateo-Cid, L., & Mendoza-González, A. (2007). Flora ficológica: Diversidad, importancia económica y conservación. En O. L. Mejía (Ed.), *Diversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 81–96). Universidad de Quintana Roo.

- Mateo-Cid, L., Mendoza, A. C., Alvarado, R., Ortega, M. R., Ceballos, J. G., Sánchez, J. D., & Méndez, I. (2020). Lista actualizada y nuevos registros de las algas rojas (Rhodophyta) del litoral de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913353.
- Mateo-Cid, L., Mendoza, A. C., Ávila, A. G., & Díaz, S. (2013). Algas marinas bénticas del litoral de Campeche, México. *Acta Botánica Mexicana*, 104, 53–92.
- Mayakun, J., Bunruk, P., & Kongsang, R. (2014). Growth rate and calcium carbonate accumulation of *Halimeda maculosa* Decaisne (Chlorophyta: Halimedaceae) in Thai waters. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 36(4), 419–423.
- Mejía, L. M., Zarza, E., & López, M. (2008b). *Barbouria yanezi* sp. nov., a new species of cave shrimp (Decapoda, Barbouriidae) from Cozumel Island, Mexico. *Crustaceana*, 81(6), 663–672.
- Mejía-Ortiz, L., López, M., & Muñoz, A. V. (2008a). Crustáceos decápodos. En L. Mejía-Ortiz (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 225–238). Universidad de Quintana Roo.
- Meléndez, E. N. (2022). Evaluación de *Chlorophyta* como indicadores de contaminación por metales pesados en el litoral sur de Santo Domingo. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 5(2), 31–64.
- Mendoza, G. A. C., & Mateo, L. E. (2007). Cinco nuevos registros de algas rojas (Rhodophyta) para el Caribe Mexicano. *Polibotánica*, 23, 101–119.

- Mendoza, G. A., Mateo, L., & Searles, B. (2000). Nuevos registros de algas marinas bentónicas de Isla Cozumel, México. *Boletín de Ciencias Marinas*, 66, 119–130.
- Mendoza-González, A. C., & Mateo-Cid, L. E. (1992). Algas marinas bentónicas de Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 18, 1–23.
- Mendoza-González, A. C., & Mateo-Cid, L. E. (2007). Cinco nuevos registros de algas rojas (Rhodophyta) para el Caribe Mexicano. *Polibotánica*, 23, 101–119.
- Mendoza-González, A. C., Mateo-Cid, L. E., & Gabrielson, P. W. (2014). *Neogoniolithon* (Corallinales, Rhodophyta) on the Atlantic coast of Mexico, including *N. siankanensis* sp. nov. *Phytotaxa*, 190(1), 64–82.
- Mendoza-González, A. C., Mateo-Cid, L. E., Acosta-Calderon, J. A., Vázquez-Rodríguez, A., Hernández-Casas, C. M., & Garduño-Acosta, G. A. (2016). Marine seaweeds of the Yucatan Peninsula: Diversity, economic importance and conservation. En *Marine benthos: Biology, ecosystem functions and environmental impact* (pp. 39–58). Nova Science Publishers.
- Mercado-Molares, C. (2022). Seasonal differences in mercury accumulation in *Acanthopleura granulata* (Gmelin, 1791) (Polyplacophora: Mollusca) in relation to length and weight in Cartagena Bay (Bolívar-Colombia). *Toxicology Letters*, 368(S1), 284, S310.
- Millán-Cortés, S. A., Rivas, N., & Chasqui, L. (2024). First report on the distribution and extension of seagrass meadows in Quitasueño Coral Bank, Southwestern Caribbean. *Acta Biológica Colombiana*, 29(1), 136–139.
<https://doi.org/10.15446/abc.v29n1.103206>

- Millet, E. M., & Álvarez, L. (2008). Peces arrecifales. En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 239–256). Universidad de Quintana Roo.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2011). *River discharge to the coastal ocean: A global synthesis*. Cambridge University Press.
- Miranda, L., & Valdivieso, J. (2000). El impacto de los fenómenos meteorológicos en las zonas costeras de México. *Revista Mexicana de Ciencias Marinas*, 12(3), 45–60.
- Miranda-Salinas, A. V., García-Garza, M. E., & León-González, J. A. D. (2016). Registros nuevos de poliquetos (Annelida) de la zona costera de Isla del Carmen, Campeche, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(4), 1212–1224.
- Montelongo, S. P., Velázquez, O. H., Armendáriz, C. R., Fernández, Á. G., Weller, D. G., Melón, E. G., & de la Torre, A. H. (2017). Metales en erizos de lima (*Diadema antillarum*) de las costas de la isla de Tenerife (Islas Canarias, España): Bioindicadores de contaminación marina. *Majorensis: Revista Electrónica de Ciencia y Tecnología*, 13, 80–88.
- Moreno, C. E. (2000). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). Manuales y tesis SEA.
- Mumby, P. J., Hastings, A., & Edwards, H. J. (2007). Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature*, 450(7166), 98–101.
- Museu Nacional. (2007). *Porifera research: Biodiversity, innovation and sustainability*. Museu Nacional, Río de Janeiro.

- Nasi, F., Auriemma, R., Bonsdorff, E., Cibic, T., Aleffi, I. F., Bettoso, N., & Del Negro, P. (2017). Biodiversity, feeding habits and reproductive strategies of benthic macrofauna in a protected area of the northern Adriatic Sea: A three-year study. *Mediterranean Marine Science*, 18(2), 292–309.
- Nava-Olvera, R., Mateo-Cid, L. E., Mendoza-González, Á. C., & García-López, D. Y. (2017). Macroalgas, microalgas y cianobacterias epífitas del pasto marino *Thalassia testudinum* (Tracheophyta: Alismatales) en Veracruz y Quintana Roo, Atlántico mexicano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(3), 429–439.
- Niño-Miranda, D., Córdoba-Martínez, A., Arias-Reyes, L., & Quirós-Rodríguez, J. (2020). Current status of *Melongena melongena* (Mollusca: Gastropoda) in Cispatá Bay, Colombian Caribbean. *Revista MVZ Córdoba*, 25(2), 1–13.
- Norzagaray-López, C. O., Calderón-Aguilera, L. E., Álvarez-Filip, L., Barranco-Servín, L. M., Cabral-Tena, R. A., Carricart-Ganivet, J. P., ... & Tortolero-Langarica, J. A. (2018). Base de datos de almacenes de carbonato de calcio en arrecifes coralinos de México: Elementos para políticas públicas. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(3), 147–163.
- Núñez, F. (2011). Caracterización geomorfológica de la ensenada Las Maritas, sector nororiental de la Bahía de Mochima, Estado Sucre, Venezuela. *Revista de Investigación*, 35(74), 157–180.
- Núñez, R. F., Ugas, M., Calderón, R., & Rivas, F. (2021). Cuantificación del carbono orgánico y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicenia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, Laguna

de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 66, 340–366.

Núñez-Ravelo, F., Ugas-Pérez, M., Hernández-Labrador, M., & Dieppa-González, G. (2016). Análisis granulométrico y contenido de CaCO₃ del depósito tipo playa, localizado en la Ensenada de Puerto Cruz, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40(89), 46–67.

Ocaña, F. A., & Pech, D. (2018). Marco metodológico para evaluar la vulnerabilidad del bentos ante múltiples presiones en la región del Gran Caribe. En *Adaptación basada en ecosistemas: Alternativa para la gestión sostenible de los recursos marinos y costeros del Caribe* (pp. 122–135).

Ochoa-Rivera, V., Granados-Barba, A., & Solís-Weiss, V. (2000). The polychaete cryptofauna from Cozumel Island, Mexican Caribbean. *Bulletin of Marine Science*, 67(1), 137–146.

Omena, E. P., Lavrado, H. P., Paranhos, R., & Silva, T. A. (2012). Spatial distribution of intertidal sandy beach polychaeta along an estuarine and morphodynamic gradient in an eutrophic tropical bay. *Marine Pollution Bulletin*, 64(9), 1861–1873.

Ortegón-Aznar, I., Sánchez-Molina, I., & Cetz, R. C. (2009). The distribution of marine algae in a coastal lagoon, northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Neotropical Biology and Conservation*, 4(2), 99–105.

Orth, R. J., Carruthers, T. J., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck Jr, K. L., ... & Williams, S. L. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56(12), 987–996.

- Ortiz, G. S., & Ortega, A. (2014). Los organismos bentónicos como bioindicadores de la salud ecológica de los océanos. En Z. C. González, A. Vallarino, J. C. Pérez, & A. M. Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 41–64). ECOSUR, INECC.
- Ortiz, R. L. (Ed.). (2014). *Bioindicadores: Uso de invertebrados marinos*. Áreas Naturales Protegidas RENANP.
- Pacheco-Cervera, M. D. C., Pacheco-Ruiz, I., Ramos-Miranda, J., Cetz-Navarro, N. P., & Soto-Ávila, J. L. (2010). Presencia del género *Caulerpa* en la Bahía de Campeche, Camp. *Hidrobiológica*, 20(1), 57–69.
- Paerl, H. W., & Paul, V. J. (2012). Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Freshwater Biology*, 57(2), 241–253.
- Parejo, P. G. (2017). Estudio de la fracción orgánica del sedimento de cinco lagunas costeras de la desembocadura del río Guadalhorce. *Encuentros en la Biología*, 10(163), 243–246.
- Parejo, P. G. (2017). Estudio de la fracción orgánica del sedimento de cinco lagunas costeras de la desembocadura del río Guadalhorce. *Encuentros en la Biología*, 10(163), 243–246.
- Parra-Luna, M., Martín-Pozo, L., Hidalgo, F., & Zafra-Gómez, A. (2020). Common sea urchin (*Paracentrotus lividus*) and sea cucumber of the genus *Holothuria* as bioindicators of pollution in the study of chemical contaminants in aquatic media: A revision. *Ecological Indicators*, 113, 106185.

- Patiño-Espinosa, S. G., Acosta-González, G., & Ardisson, P. L. (2022). Diversidad de macroalgas bentónicas y su relación con el sustrato en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93, e932896.
- Pawlik, J. R., Loh, T., & McMurray, A. (2018). A review of bottom-up vs. top-down control of sponges on Caribbean fore-reefs: What's old, what's new and future directions. *PeerJ*, 6, e4343. <https://doi.org/10.7717/peerj.4343>
- Pedroche, F., & Senties, A. (2020). Diversidad de macroalgas marinas en México: Una actualización florística y nomenclatural. *Cymbella*, 6(1), 4–55.
- Pérez, A. F., Gil, D., & Rubilar, T. (2014). Echinodermata. En J. A. Calcagno (Ed.), *Los invertebrados marinos* (pp. 295–316). Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Perry, C. T., Murphy, G. N., Kench, P. S., Edinger, E. N., Smithers, S. G., Steneck, R. S., & Mumby, P. J. (2014). Changing dynamics of Caribbean reef carbonate budgets: Emergence of reef bioeroders as critical controls on present and future reef growth potential. *Proceedings of the Royal Society B*, 281(1796), 20142018.
- Pineda, V. (2009). Granulometría y geoquímica de los sedimentos marinos en el área comprendida entre el Seno Reloncaví y Golfo Corcovado, Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 32(1), 27–47.
- Pinochet, J., Urbina, M. A., & Lagos, M. E. (2020). Marine invertebrate larvae love plastics: Habitat selection and settlement on artificial substrates. *Environmental Pollution*, 257, 113571.

- Piñón-Gimate, A., Soto-Jiménez, M. F., Ochoa-Izaguirre, M. J., García-Pagés, E., & Páez-Osuna, F. (2009). Floraciones de macroalgas y $\delta^{15}\text{N}$ en lagunas costeras subtropicales del sureste del Golfo de California: Discriminación entre efluentes agrícolas, de camarones y de aguas residuales. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1144–1151.
- Poore, G. C. B., & Ahyong, S. T. (2004). *Marine decapod crustacea of Southern Australia: A guide to identification*. CSIRO Publishing.
- Pörtner, H. O., & Farrell, A. P. (2008). Physiology and climate change. *Science*, 322(5902), 690–692.
- Putra, S. A., Ambo-Rappe, R., Jompa, J., & de Voogd, N. J. (2024). Preliminary study of marine sponges (Porifera) in the littoral of Spermonde Archipelago, Indonesia. *ZooKeys*, 1208, 275.
- Quan-Young, L. I., Jiménez-Flores, S. G., & Espinoza-Ávalos, J. (2006). Flora béntica y reproducción de las algas *Batophora* spp. (Chlorophyta: Dasycladaceae) de una laguna costera contaminada (Bahía de Chetumal, México). *Revista de Biología Tropical*, 54(2), 341–355.
- Quijada Mendoza, I., & Zamorano Orozco, J. J. (2024). Geomorfología de la isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas*, 115.
- Quiroga, G. B. (2019). Situación de los arrecifes en Cozumel: Reporte técnico. Departamento de Monitoreo Biológico y Vinculación Académica, PNAC.

- Quirós, J. A., & Campos, N. H. (2010). Dinámica espacial de crustáceos decápodos asociados a céspedes algales en el departamento de Córdoba, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 15(3), 91–106.
- Quiroz, G. N., Aguilar, E. L., Acosta, J., Álvarez, L., & Arriola, F. (2023). Biodiversity of epiphytic marine macroalgae in Mexico: Composition and current status. *Botanica Marina*, 66(3), 181–189. <https://doi.org/10.1515/bot-2023-0009>
- Quiroz-González, N., León-Álvarez, D., & Rivas-Acuña, M. G. (2017). Nuevos registros de algas verdes marinas (Ulvophyceae) para Tabasco, México. *Acta Botánica Mexicana*, 118, 121–138.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., & Wiseman, W. J. (2002). Gulf of Mexico hypoxia, aka “The dead zone.” *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 235–263.
- Ramírez, A. C., Calva, L. G. B., & Núñez, M. L. R. (2023). Composición taxonómica y afinidad por un sustrato de macroalgas marinas conspicuas del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 130.
- Ramírez, F. C. (2004). Pozas de marea. En E. E. Boschi & M. B. Cousseau (Eds.), *La vida entre mareas: Vegetales y animales de las costas de Mar del Plata* (pp. 43–48). Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C., Watson, A., Heap, H., Banes, R., & Rachel, Q. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society.

- Reef, R., Pandolfi, J. M., & Lovelock, C. E. (2012). The effect of nutrient enrichment on the growth, nucleic acid concentrations, and elemental stoichiometry of coral reef macroalgae. *Ecology and Evolution*, 2(8), 1985–1995. <https://doi.org/10.1002/ece3.333>
- Reimer, J., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2014). Introducción a la química marina: Importancia de los principales nutrientes inorgánicos en el océano. *Tema sobre Investigaciones Costeras*, 1, 7–9.
- Reyes-Bonilla, H., Escobosa-González, L. E., Cupul-Magaña, A. L., Medina-Rosas, P., & Calderón-Aguilera, L. E. (2013). Estructura comunitaria de corales zooxantelados (Anthozoa: Scleractinia) en el arrecife coralino de Carrizales, Pacífico Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 583–594.
- Reyes-Bonilla, H., Millet-Encalada, M., & Álvarez-Filip, L. (2014). Community structure of scleractinian corals outside protected areas in Cozumel Island, Mexico. *Atoll Research Bulletin*, 600(601), 1–13.
- Rey-Villiers, N., Hernández-Fernández, L., Caballero, H., López, M. T., Angulo, A. P., & Espinosa. (2023). Bosques octocorales: Distribución, abundancia y riqueza de especies en los arrecifes coralinos cubanos. En V. N. Zlatarski, J. K. Reed, S. A. Pomponi, S. Brooke, & S. Farrington (Eds.), *Arrecifes coralinos de Cuba* (Coral Reefs of the World, vol. 18). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36719-9_9
- Riisgård, H. U., & Larsen, P. S. (2010). Particle capture mechanisms in suspension-feeding invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, 418, 255–293.

- Rioja, N. R., Chiappa, X., & Sheppard, C. (2012). Effects of hurricanes on the stability of reef-associated landscapes. *Ciencias Marinas*, 38(1A), 47–55.
- Rioja-Nieto, R., Chiappa-Carrara, X., & Sheppard, C. (2012). Efectos de los huracanes sobre la estabilidad de paisajes asociados con arrecifes coralinos. *Ciencias Marinas*, 38(1A), 47–55.
- Ríos, J. E., Juárez, E., & Galván, C. M. (2017). Invertebrados marinos. En *La biodiversidad en Jalisco. Estudio de estado* (Vol. II, pp. 251–269). CONABIO.
- Robinson, N., Winberg, P., & Kirkendale, L. (2012). Genetic improvement of macroalgae: Status to date and needs for the future. *Journal of Applied Phycology*, 24(5), 995–1005. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9950-x>
- Rodemann, J. R., James, W. R., Rehage, J. S., Furman, B. T., Pittman, S. J., & Santos, R. O. (2025). Response of submerged aquatic vegetation seascapes to a large-scale seagrass die-off: A case study in Florida Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 318, 109221.
- Rodríguez, Z. M. T., Troche, C., Vázquez, A. D., Márquez, J. D., Vázquez, B., Valdarrama, L., Velázquez, S., Cruz, M. I., Ressi, R., Uribe, A., Cerdeira, S., Acosta, J., Díaz, J., Jiménez, R., Fueyo, L., & Galindo, C. (2013). *Manglares de México: Extensión, distribución y monitoreo*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 128 p.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., ... & Van Tussenbroek, B. I. (2020).

Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018–2019. *PeerJ*, 8, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>

Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B., & Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014–2015). En *Florecimientos algales nocivos en México* (pp. 352–365). Ensenada: CICESE.

Rodríguez-Martínez, R., Quintana-Pali, G., Trujano-Rivera, K. I., Herrera, R., García-Rivas, M. C., Gerardo-Castañeda, A. O., Maldonado, G., & Jordán-Dahlgren, E. (2021). *Sargassum* landings have not compromised nesting of loggerhead and green sea turtles in the Mexican Caribbean. *Journal of Environmental Management*, 299, 113614.

Rojas-Higuera, P. J., & Pabón-Caicedo, J. D. (2015). Sobre el calentamiento y la acidificación del océano mundial y su posible expresión en el medio marino costero colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(151), 201–217.

Rosa, R., Roura, Á., Amor, M., Gleadall, I. G., Guerra, Á., González, Á. F., ... & Villanueva, R. (2024). *Octopus vulgaris*, the common octopus. En *Octopus biology and ecology* (pp. 187–216). Academic Press.

Rosenberg, G., Moretzsohn, F., & García, E. F. (2009). Gastropoda (Mollusca) of the Gulf of Mexico. En D. L. Felder & D. K. Camp (Eds.), *Gulf of Mexico—Origins, Waters, and Biota. Vol. 1. Biodiversity* (pp. 579–699). Texas A&M University Press.

- Rosenberg, R., & Loo, L. O. (1988). Marine eutrophication induced oxygen deficiency: Effects on soft bottom fauna, western Sweden. *Ophelia*, 29(2), 213–225.
- Roth, F., Saalman, F., Thomson, T., Coker, D. J., Villalobos, R., Jones, B. H., ... & Carvalho, S. (2018). Coral reef degradation affects the potential for reef recovery after disturbance. *Marine Environmental Research*, 142, 48–58.
- Ruiz-Zárte, M. A., Hernandez-Landa, R. C., Gonzalez-Salas, C., Nuñez-Lara, E., & Arias-Gonzalez, J. E. (2003). Condition of coral reef ecosystems in central southern Quintana Roo, México (Part 1: Stony corals and algae). En J. C. Lang (Ed.), *Status of coral reefs in the western Atlantic: Results of initial surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) program. Atoll Research Bulletin*, 496, 318–337.
- Ruiz-Zárte, M. A., Hernandez-Landa, R. C., Gonzalez-Salas, C., Nuñez-Lara, E., & Arias-Gonzalez, J. E. (2003). Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*.
- Ruppert, E. E., Fox, R. S., & Barnes, R. D. (2004). *Invertebrate zoology: A functional evolutionary approach*. Cengage Learning.
- Sabatini, S. E., & Calcagno, J. A. (2014). Los moluscos como bioindicadores. En J. A. Calcagno (Ed.), *Los invertebrados marinos* (pp. 193–196). Fundación de Historia Natural Félix de Azara.

- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., ... & Millero, F. J. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367–371.
- Sánchez, B. F., García, P., & Calvillo, L. (2016). Mares calcíticos y aragoníticos: Efectos en organismos formadores de arrecifes a través del tiempo. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 19(1), 45–53.
- Sánchez-Molina, I., González-Ceballos, J., Zetina-Moguel, C., & Casanova-Cetz, R. (2007). Análisis de la biodiversidad de algas marinas situadas entre Uaymitún y Chuburná, Yucatán. *Ingeniería*, 11(1), 43–51.
- Sanderson, P. G., & Taylor, D. M. (2003). Short-term water quality variability in two tropical estuaries, Central Sumatra. *Estuaries*, 26(1), 156–165.
- Sangil, C., & Guzman, H. M. (2016). Assessing the herbivore role of the sea-urchin *Echinometra viridis*: Keys to determine the structure of communities in disturbed coral reefs. *Marine Environmental Research*, 120, 202–213.
- Santander, L. C., López, M., Mejía, L., & Gallegos, O. (2012). Evaluación del impacto ambiental de arrecifes artificiales para uso turístico en Cozumel, México. *Investigación y Ciencia*, 20(56), 18–26.
- Santelices, B., Montalva, S., & Oliger, P. (1981). Competitive algal community organization in exposed intertidal habitats from central Chile. *Marine Ecology*, 267–276.

- Scheibling, R. E. (1982). Feeding habits of *Oreaster reticulatus* (Echinodermata: Asteroidea). *Bulletin of Marine Science*, 32(2), 504–510.
- Schneider, C. W., & Searles, R. B. (1991). *Seaweeds of the southeastern United States: Cape Hatteras to Cape Canaveral*. Duke University Press.
- SECTUR (Secretaría de Turismo). (2013). *Agenda de competitividad de los destinos turísticos de México: Estudio de competitividad turística del destino Cozumel*.
- Sentíes, A., & Dreckmann, K. M. (2014). Biodiversidad de las macroalgas marinas de la Familia Rhodomelaceae (Rhodophyta) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, S62–S68.
- Sheppard, C. R. C., Davy, S. K., & Pilling, G. M. (2010). *The biology of coral reefs*. Oxford University Press.
- Sibaja-Cordero, J. A., Camacho-García, Y. E., & Vargas-Castillo, R. (2014). Riqueza de especies de invertebrados en playas de arena y costas rocosas del Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62(4), 63–84.
- Siddik, A. A., & Satheesh, S. (2021). Interactive effects of light and substrate colour on the recruitment of marine invertebrates on artificial materials. *Community Ecology*, 22(1), 69–78.
- Siegel, K. J., Cabral, R. B., McHenry, J., Ojea, E., Owashi, B., & Lester, S. E. (2019). Sovereign states in the Caribbean have lower social-ecological vulnerability to coral bleaching than overseas territories. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1897), 20192078.

- Silva, R. C., Martínez, M., Moreno, P., Mendoza, E., López, J., Lithgow, D., Vázquez, G., Martínez, E. E., Monroy, R., Cáceres, J. I., Ramírez, A., & Boy, M. (2017). *Aspectos generales de la zona costera*. UNAM; INECOL.
- Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A., & Honey-Escandón, M. (2014). Biodiversidad de equinodermos (Echinodermata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 441–449.
- Solís-Marín, F., & Laguarda, A. (2008). Equinodermos. En O. L. Mejía (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 187–214). Universidad de Quintana Roo.
- Soto, S. M., Contreras, S. M., Ortega, A. R., & Altamirano, M. (2021). Revisión bibliográfica de las macroalgas marinas como bioindicadores. *Algas*, 57, 37–45.
- Souza, T. (2025). Non-metric multidimensional scaling (NMDS). En *Advanced statistical analysis for soil scientists* (pp. 79–102). Springer, Cham.
- Srivastava, A. K., & Singh, V. K. (2021). Feeding behaviours in gastropod molluscs. *Journal of Cell and Molecular Biology*, 5, 013.
- Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A., & Tegner, M. J. (2002). Kelp forest ecosystems: Biodiversity, stability, resilience and their future. *Environmental Conservation*, 29(4), 436–459.
- Suárez, A. M., & Martínez-Daranas, B. (2020). Similitud de la ficoflora marina en zonas del Atlántico Occidental Tropical y Subtropical. *Caldasia*, 42(1), 85–95.

- Suárez-Moo, P., Rivera-Domínguez, A. J., Márquez-Velázquez, N. A., & Prieto-Davó, A. (2024). Species diversity and mitochondrial DNA analysis of sponges (Porifera, Demospongiae) in an anchialine cave on the Yucatan Peninsula. *bioRxiv*, 2024–10.
- Tagliafico, A., Rangel, M. S., & Rago, N. (2012). Distribución, densidad y estructura de talla de *Oreaster reticulatus* y *Luidia senegalensis* (Echinodermata: Asteroidea) en isla de Cubagua, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 60(3), 1149–1159.
- Taplin, K. A., Irlandi, E. A., & Raves, R. (2005). Interference between the macroalga *Caulerpa prolifera* and the seagrass *Halodule wrightii*. *Aquatic Botany*, 83(3), 175–186.
- Taylor, W. R. (1954). Sketch of the character of the marine algal vegetation of the shores of the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin of the Fish and Wildlife Service*, 55, 177–192.
- Torreblanca-Ramírez, C., Flores-Garza, R., Flores-Rodríguez, P., García-Ibáñez, S., & Galeana-Rebolledo, L. (2012). Riqueza, composición y diversidad de la comunidad de moluscos asociada al sustrato rocoso intermareal de playa Parque de la Reina, Acapulco, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47(2), 283–294.
- Torres, D., Castro, J., & Vílchez, F. (2020). Prospección biológica-poblacional de las macroalgas marinas de importancia comercial en las praderas de Chérrepe y playa Las Rocas (30 octubre–4 noviembre 2017). *Instituto del Mar de Perú*, 47(3), 367–375.

- Torres, M., & Calva, L. (2012). Nutrientes en arrecifes de coral: Un caso de estudio. *ContactoS*, 85, 42–50.
- Torruco, D., González, A., Ruiz, L., Reyes, D. T., & Torruco, A. D. (2012). Pozas de marea: Un hábitat extremo en un ambiente extremo. *CONABIO. Biodiversitas*, 104, 12–16.
- Torruco, D., González-Solís, A., & Torruco-González, A. D. (2021). Large-scale and long-term distribution of corals in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea of Mexico and adjacent areas: Coral's distribution in Mexico and adjacent areas. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101764.
- Twenhofel, W., & Tyler, S. (1941). *Methods of study of sediments*. McGraw Hill Book Company.
- Tzompantzi, D. B., Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A., Abreu-Pérez, M., & Durán-González, A. (1999). Equinoideos (Echinodermata: Echinoidea) del Caribe Mexicano: Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, 47(4), 799–808.
- Ugalde, D., Gómez, P., & Simões, N. (2015). Esponjas marinas (Porifera: Demospongiae) del Golfo de México, nuevos registros y redescrición de *Erylus trisphaerus* (de Laubenfels, 1953). *Zootaxa*, 3911(2), 151–183.
- Uriz, M. J., Turon, X., Becerro, M. A., & Agell, G. (2003). Siliceous spicules and skeleton frameworks in sponges: Origin, diversity, ultrastructural patterns, and biological functions. *Microscopy Research and Technique*, 62(4), 279–299.

- Valdés, J., & Castillo, A. (2014). Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27° S), Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3), 497–513.
- Valiela, I., McClelland, J., Hauxwell, J., Behr, P. J., Hersh, D., & Foreman, K. (1997). Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnology and Oceanography*, 42(5), 1105–1118.
- van de Leemput, I. A., Hughes, T. P., van Nes, E. H., et al. (2016). Multiple feedbacks and the prevalence of alternate stable states on coral reefs. *Coral Reefs*, 35, 857–865. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1439-7>
- Vassallo, A., Dávila, Y., Luviano, N., Deneb, S., Vital, X. G., Conejeros, C. A., Vázquez, L., & Álvarez, F. (2014). Inventario de invertebrados de la zona rocosa intermareal de Montepío, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(2).
- Vázquez, G. M., May, D., & Alamilla, E. (2015). Riqueza específica y biodiversidad de Cozumel, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, 19, 137–171.
- Vázquez-Benavides, J., Alvarado-Barrientos, M. S., & Pineda-López, M. D. R. (2024). Revisión cuantitativa (1990–2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO₂ y CH₄ de manglares. *Madera y Bosques*, 30(SPE).
- Vergara-Carranza, C., López, N., & Piñón-Gimate, A. (2024). Use of intertidal macroalgae as bioindicators of anthropogenic nutrient disturbance in the rocky coasts of the tropical central Mexican Pacific. *Ciencias Marinas*, 50.

- Veron, J. E. N. (2011). Coral taxonomy and evolution. En N. Stambler & Z. Dubinsky (Eds.), *Coral reefs: An ecosystem in transition* (pp. 37–46). Springer.
- Vilchis, M. I., Dreckmann, K. M., García-Trejo, E. A., Hernández, O. E., & Sentíes, A. (2018). Patrones de distribución de las grandes macroalgas en el Golfo de México y el Caribe mexicano: Una contribución a la biología de la conservación. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(1), 183–192.
- Walther-Mendoza, M., Reyes-Bonilla, H., LaJeunesse, T. C., & López-Pérez, A. (2016). Distribución y diversidad de dinoflagelados simbióticos en corales pétreos de la costa de Oaxaca, Pacífico de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2), 417–426.
- Walton, J. H. (1948). Marine algae of the Bermuda Islands. *Bermuda Biological Station*.
- Ward, J. R., Rypien, K. L., Bruno, J. F., Harvell, C. D., Jordan-Dahlgren, E., Mullen, K. M., ... & Smith, G. (2006). Coral diversity and disease in Mexico. *Diseases of Aquatic Organisms*, 69, 23–31.
- Warne, J. E. (1975). Perforaciones como fósiles traza y los procesos de bioerosión marina. En R. W. Frey (Ed.), *El estudio de fósiles traza* (pp. 181–229). Springer.
- Weather Spark. (2025). Datos históricos meteorológicos en Cozumel, México. Recuperado el 13 de enero de 2024 de: <https://es.weatherspark.com/h/m/14482/2022/7/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-julio-de-2022-en-Cozumel-M%C3%A9xico#Figures-ObservedWeather>
- Webb, P. (2019). *Introduction to oceanography*. Roger Williams University.

- Weiss, R. F. (1970). The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 17(4), 721–735. Elsevier.
- Wernberg, T., Smale, D. A., & Thomsen, M. S. (2012). A decade of climate change experiments on marine organisms: Procedures, patterns and problems. *Global Change Biology*, 18(5), 1491–1498.
- Williams, P. (2009). Christmas tree worms (*Spirobranchus giganteus*) and their role as bioindicators of environmental stress on coral reefs of Bonaire, N.A. *Physics*, 6, 58–65.
- Winfield, I., Ortiz, M., & Cházaro, S. (2023). Biodiversity and new records of benthic amphipods (Crustacea: Peracarida: Amphipoda) from coral reef protected natural areas in the Mexican Caribbean Sea. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94, e944975.
- Wong, J. G. R., & Van Tussenbroek, B. I. (Eds.). (2022). *Los pastos marinos mexicanos: Las plantas invisibles*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- WoRMS Editorial Board. (2023). *World Register of Marine Species*. Recuperado el 24 de mayo de 2023 de <https://www.marinespecies.org/>
- Żbikowski, R., Szefer, P., & Latała, A. (2007). Comparison of green algae *Cladophora* sp. and *Enteromorpha* sp. as potential biomonitors of chemical elements in the southern Baltic. *Science of the Total Environment*, 387(1–3), 320–332.

Zika, J. D., Laliberté, F., Mudryk, L. R., Sijp, W. P., & Nurser, A. J. G. (2015). Changes in ocean vertical heat transport with global warming. *Geophysical Research Letters*, 42, 4940–4948.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00253

Matrícula: 2223803952

Biodiversidad de macroalgas,
pastos marinos e
invertebrados en la zona
noroeste de la isla de
Cozumel

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:00 horas
del día 4 del mes de junio del año 2026 en la Unidad
Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los
suscritos miembros del jurado:

DRA. MARIA LUISA NUÑEZ RESENDIZ
DRA. ALICIA CRUZ MARTINEZ
DRA. MARIA DEL ROCIO ZARATE HERNANDEZ
M. EN B.E. SERGIO HUMBERTO ALVAREZ HERNANDEZ

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de
Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen
de Grado cuya denominación aparece al margen, para la
obtención del grado de:

MAESTRO EN BIOLOGÍA

DE: FRANCISCO JAVIER RAMIREZ MALDONADO



FRANCISCO JAVIER RAMIREZ MALDONADO

ALUMNO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del
Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad
Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado
resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó al
interesado el resultado de la evaluación y, en caso
aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTORA DE LA DIVISIÓN DE CBS

DRA. EDITH ARENAS RIOS

PRESIDENTA

DRA. MARIA LUISA NUÑEZ RESENDIZ

VOCAL

DRA. ALICIA CRUZ MARTINEZ

VOCAL

DRA. MARIA DEL ROCIO ZARATE
HERNANDEZ

SECRETARIO

M. EN B.E. SERGIO HUMBERTO ALVAREZ
HERNANDEZ