

ESTUDIO PREVIO JUSTIFICATIVO PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA

Área de Protección de Flora y Fauna

Cenote Aerolito

Quintana Roo

JUNIO 2023



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONANP

COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS
NATURALES PROTEGIDAS



Cítese:

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2023. Estudio Previo Justificativo para la Declaratoria del Área Natural Protegida Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito. Cozumel, Quintana Roo, México. 172 páginas, incluyendo anexos.

Fotos de portada: Sistema de cavernas subterráneas en El Aerolito-Estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*) Lauren Miroult/Archivo CONANP

El presente documento fue elaborado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas por conducto de la Dirección General de Conservación, la Dirección Regional Península de Yucatán y Caribe Mexicano y la Dirección del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, con la participación de: César Hernández Hernández, Javier Eduardo Castillo López, Alejandro Rendón Correa, Ismael Arturo Montero García, Jose Eulalio Castañeda Archundia, Ángel Alexis Camacho Villaseñor, Alberto León Oropeza, Blanca Alicia Quiroga García, Esteban Manuel Martínez Salas, Herbario Nacional, Instituto de Biología, UNAM.

DIRECTORIO

Maria Luísa Albores González

Titular de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Humberto Adán Peña Fuentes

Titular de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Gloria Fermina Tavera Alonso

Directora General de Conservación

Fernando Alonso Orozco Ojeda

Director Regional Península de Yucatán y Caribe Mexicano

AUTORIZÓ

Humberto Adán Peña Fuentes

Titular de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

VALIDÓ

Gloria Fermina Tavera Alonso

Directora General de Conservación

REVISÓ

Lilián I. Torija Lazcano

Directora de Representatividad y Creación de Nuevas Áreas Naturales Protegidas

Con fundamento en los artículos 67 fracción I, 69, fracción VIII y 72 fracción VI, del Reglamento Interior de la SEMARNAT, publicado en Diario Oficial de la Federación el 27 de julio de 2022.



Contenido

INTRODUCCIÓN	5
I. INFORMACIÓN GENERAL	7
A) NOMBRE DEL ÁREA PROPUESTA	7
B) ENTIDAD FEDERATIVA Y MUNICIPIOS EN DONDE SE LOCALIZA EL ÁREA	7
C) SUPERFICIE	7
D) VÍAS DE ACCESO.....	7
E) MAPA(S) CON LA DESCRIPCIÓN LIMÍTROFE	10
F) NOMBRE DE LAS ORGANIZACIONES, INSTITUCIONES, ORGANISMOS GUBERNAMENTALES O ASOCIACIONES CIVILES PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO PREVIO JUSTIFICATIVO	10
II. EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	13
A) DESCRIPCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS, ESPECIES O FENÓMENOS NATURALES QUE SE PRETENDEN PROTEGER.....	13
1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	29
2. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS.....	42
B) RAZONES QUE JUSTIFIQUEN EL RÉGIMEN DE PROTECCIÓN.....	71
C) ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS, ESPECIES O FENÓMENOS NATURALES..	75
D) RELEVANCIA, A NIVEL REGIONAL Y NACIONAL, DE LOS ECOSISTEMAS REPRESENTADOS EN EL ÁREA PROPUESTA	77
D.1) CONTRIBUCIÓN DEL ÁREA ANTE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	78
E) ANTECEDENTES DE PROTECCIÓN DEL ÁREA.....	82
F) UBICACIÓN RESPECTO A LOS SITIOS PRIORITARIOS PARA LA CONSERVACIÓN DETERMINADAS POR LA COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD	84
III. DIAGNÓSTICO DEL ÁREA	89
A) CARACTERÍSTICAS HISTÓRICAS Y CULTURALES	89
A.1) HISTORIA DEL ÁREA.....	89
A.2) ARQUEOLOGÍA	90
B) ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS RELEVANTES DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL	92
C) USOS Y APROVECHAMIENTOS, ACTUALES Y POTENCIALES DE LOS RECURSOS NATURALES.100	
C.1) Usos actuales.....	100
C.2) Usos potenciales	102
C.3) Usos tradicionales	103
D) SITUACIÓN JURÍDICA DE LA TENENCIA DE LA TIERRA.....	104



E) PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN QUE SE HAYAN REALIZADO O QUE SE PRETENDAN REALIZAR	104
F) PROBLEMÁTICA ESPECIFICA QUE DEBA TOMARSE EN CUENTA.....	112
F.1) VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO	115
G) CENTROS DE POBLACIÓN EXISTENTES AL MOMENTO DE ELABORAR EL ESTUDIO.....	122
IV. PROPUESTA DE MANEJO DEL ÁREA	123
A) ZONIFICACIÓN Y SU SUBZONIFICACIÓN A QUE SE REFIEREN LOS ARTÍCULOS 47 BIS Y 47 BIS 1 DE LA LGEEPA.....	123
B) TIPO O CATEGORÍA DE MANEJO	128
C) ADMINISTRACIÓN	128
D) OPERACIÓN.....	129
E) FINANCIAMIENTO.....	131
V. BIBLIOGRAFÍA.....	132
VI. ANEXOS.....	150
1) LISTADO DE ESPECIES.....	150
FLORA.....	151
FAUNA	154
Invertebrados.....	154
2) ESPECIES DE FLORA Y FAUNA EN ALGUNA CATEGORÍA DE RIESGO CONFORME A LA NOM-059-SEMARNAT-2010, REGISTRADAS EN LA PROPUESTA DE APFF CENOTE AEROLITO.....	164
3) LISTA DE COORDENADAS	166
4) REPORTE DE CAMPO.....	171
5) FOTOGRAFÍAS DE ESPECIES Y ECOSISTEMAS	172





INTRODUCCIÓN

La historia geológica de la península de Yucatán, al igual que la de la isla de Cozumel, ha propiciado la formación de sistemas limnológicos muy particulares que incluyen aguas expuestas y subterráneas asociadas a estructuras derivadas de la disolución de la roca caliza, conocidas como cenotes y sus sistemas de cuevas subterráneas. Algunos cenotes, los más cercanos a la costa, poseen cualidades muy particulares ya que tienen influencia tanto de agua dulce epicontinental como de agua salada marina, que ingresa por la red de cavernas desde el mar. A estos sistemas con zonas de encuentro e interacción entre aguas con diferentes gradientes de salinidad se les conoce como cuevas anquihalinas. Se estima que en Quintana Roo existen más de 2,000 cenotes que representan uno de los rasgos geológicos más característicos y de belleza única de las costas del Caribe mexicano. Actualmente en Cozumel se han registrado 18 cenotes que, debido a su carácter costero y poca elevación sobre el nivel del mar, la mayoría de estos son de tipo cueva y están totalmente inundados.

El Aerolito, en la costa occidental de Cozumel, es uno de los dos cenotes de la isla con conexión directa al mar a través de un pasaje submarino de 240 m. La vegetación adyacente a su entrada en la parte terrestre es selva baja subperennifolia, destacando en la parte noreste la asociación de mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Este último es vital para el funcionamiento de todo el sistema cavernícola, ya que la materia orgánica que provee (hojas y detritus), es la principal fuente de energía que ingresa al ecosistema y que es aprovechada en primera instancia por tapetes de bacterias y algas en las paredes y techo del cenote. A su vez, al desprenderse, precipitarse al fondo y difuminarse en la red de cuevas y bóvedas, estas agregaciones son la fuente de alimento de una enorme variedad de especies, muchas de ellas solo registradas en el cenote El Aerolito y otras tantas aún sin identificar.

Es tal la diversidad de especies que habitan en la propuesta de Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito (APFF Cenote Aerolito), que el 60% de la fauna anquihalina registrada en México habita en él, con alrededor de 100 taxa, de los cuales una tercera parte aún se encuentra sin identificar, por lo que podrían representar nuevas especies. En particular El Aerolito destaca también por ser la cueva inundada con la mayor riqueza de equinodermos (estrellas de mar, erizos, ofiuros) en todo el mundo, con más de 30 especies registradas, incluyendo microendemismos como la estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*), única estrella de mar en el mundo que habita sistemas cavernícolas y el ofiuro (*Ophionereis commutabilis*).

Sin embargo, esta biota tan singular, se encuentra gravemente amenazada principalmente por los cambios de uso de suelo y modificación del entorno costero aledaño para la construcción de infraestructura hotelera y de servicios turísticos con afectaciones como descargas de aguas residuales y derrames de hidrocarburos, que en un solo evento catastrófico podrían extinguir gran parte de las especies presentes. En este sentido cobra gran relevancia la declaratoria del Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito ya que al proteger sus ecosistemas terrestres y subterráneos se garantizará la continuidad de una serie de procesos ecológicos y evolutivos vitales como la polinización, el intercambio y flujo de especies, así como procesos de aislamiento y especiación, y múltiples servicios ambientales que proveen. La eventual Área Natural Protegida conservará el hábitat de al menos 293 especies nativas (60 vegetales y 233 animales), 25 de estas consideradas bajo alguna categoría de protección de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, "Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y





especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo”, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30 de diciembre de 2010, y en la “Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de noviembre de 2019 (NOM-059-SEMARNAT-2010) y 27 con algún grado de endemismo incluyendo hasta ahora cinco especies que sólo habitan en el cenote El Aerolito.

Finalmente, con el objetivo de asegurar la calidad de la información, se realizó un procedimiento de validación nomenclatural y de la distribución geográfica de las especies utilizando referentes actualizados de información especializada, por lo que solo se integran nombres científicos aceptados y válidos conforme a los sistemas de clasificación y catálogos de autoridades taxonómicas correspondientes a cada grupo biológico. En virtud de lo anterior, es posible que la nomenclatura actualizada no coincida con la contenida en los instrumentos normativos a los que se hace referencia en el presente documento, por lo cual, en los anexos (listas de especies) se realizó una anotación para aclarar la correspondencia de los nombres científicos. En cuanto a los nombres comunes, al ser una característica biocultural que depende del conocimiento ecológico tradicional de las comunidades locales, y debido a que, por efecto del sincretismo cultural, están sujetos a variaciones lingüísticas y gramaticales, no existe un marco normativo que regule su asignación, por lo que se priorizó el uso de nombres comunes locales recopilados durante el trabajo de campo.





I. INFORMACIÓN GENERAL

A) NOMBRE DEL ÁREA PROPUESTA

Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito (APFF Cenote Aerolito).

B) ENTIDAD FEDERATIVA Y MUNICIPIOS EN DONDE SE LOCALIZA EL ÁREA

El área propuesta, se localiza en la costa noroeste de la isla de Cozumel, la isla más grande del Caribe mexicano, a 5 km al sur de San Miguel de Cozumel en el municipio de Cozumel, en el estado de Quintana Roo (INEGI, 2022a) (Figura 1).

C) SUPERFICIE

La propuesta de ANP abarca una superficie total de 10-19-91.13 hectáreas (DIEZ HECTÁREAS, DIECINUEVE ÁREAS Y NOVENTA Y UNO PUNTO TRECE CENTIÁREAS), comprende cuatro polígonos y cuenta con una zona núcleo cuya superficie es de 3-62-42.44 hectáreas (TRES HECTÁREAS, SESENTA Y DOS ÁREAS Y CUARENTA Y DOS PUNTO CUARENTA Y CUATRO CENTIÁREAS) y una zona de amortiguamiento con una superficie de 6-57-48.69 hectáreas (SEIS HECTÁREAS, CINCUENTA Y SIETE ÁREAS Y CUARENTA Y OCHO PUNTO SESENTA Y NUEVE CENTIÁREAS), en su conjunto representan el 0.016% de la superficie total de Cozumel cuya extensión territorial es de 64,733 ha (647.33 km²) (POEQroo, 2022; INEGI 2022a) (Figura 2).

D) VÍAS DE ACCESO

Para acceder a la propuesta de ANP, existen diversas vías de acceso, la principal es la carretera Costera-Sur C-1, también es posible acceder por vía marítima o llegando directamente a la isla de Cozumel desde el continente, ya sea por vías marítima o aérea (Figura 3), las cuales se describen a continuación:

1. La principal vía de acceso es la carretera Costera Sur C-1 (Avenida Rafael Melgar), partiendo de la cabecera municipal de San Miguel de Cozumel se toma esta vialidad con dirección norte-sur, en el kilómetro 3.5 a mano derecha se accede a la calle Caleta. En esta calle, con dirección a la Marina FONATUR Cozumel, aproximadamente a 100 m a la derecha se ubica el acceso principal a la propuesta de APFF Cenote Aerolito (INEGI, 2020).
2. Desde el continente por vía marítima es posible acceder a la isla de Cozumel mediante transbordador marítimo tipo ferry a las dos terminales marítimas que existen, así como de cuatro Terminales de Cruceros y la Marina FONATUR Cozumel, posteriormente se continua por carretera Costera-Sur C-1 hasta la citada Marina (INEGI, 2020).
3. Por vía aérea, diversos vuelos comerciales arriban al Aeropuerto Internacional de Cozumel, se toma la Av. 65 rumbo sur y a los 7 km aproximadamente se entronca con la carretera Costera-Sur C-1 con dirección a la Marina FONATUR Cozumel (INEGI, 2020).
4. Por vía marítima es posible llegar en embarcación a la Marina FONATUR Cozumel desde donde se accede a la calle Caleta donde, desde esta ubicación, se encuentra al lado izquierdo del acceso.





Figura 1. Ubicación y delimitación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





Propuesta de Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
Abril 2023

Simbología

- Límite de la propuesta de área natural protegida
- Cuerpo de agua
- Línea de costa
- Carretera
- Marina
- ★ Localidades

Fuentes de Información Cartográfica

INEGI, 2018. Carta Topográfica F16D71a 1: 20,000.
INEGI, 2021. Carta Topográfica F16D71 (Cozumel) Escala 1:50,000.
INEGI, 2021. Censo de Población y Vivienda 2020.
INEGI, 2022. Marco Geoestadístico Diciembre.

Especificaciones Cartográficas

Proyección: UTM
Zona: 16 Norte
Datum: ITRF08
1:4,000
1 cm = 40 m
0 20 40 80
Metros

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

CONANP
COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

Superficie

Figura 2. Superficie de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





E) MAPA(S) CON LA DESCRIPCIÓN LIMÍTROFE

La propuesta de APFF Cenote Aerolito se ubica a 3.5 km de San Miguel de Cozumel, la localidad más grande del municipio. Al norte está delimitada por el camino pavimentado de acceso al proyecto Hotel Marina Cozumel II; al este con la Carretera Costera Sur; al sur por la calle Caleta y al oeste con las instalaciones de la Marina FONATUR Cozumel.

El polígono general del ANP se delimita por las coordenadas métricas UTM zona 16 norte extremas siguientes: (Tabla 1, Figura 4).

Tabla 1. Coordenadas extremas de la propuesta de APFF Cenote Aerolito.

Coordenadas	X	Y
Máxima	502,208.6500	2,263,520.4644
Mínima	502,652.9042	2,262,970.4612

F) NOMBRE DE LAS ORGANIZACIONES, INSTITUCIONES, ORGANISMOS GUBERNAMENTALES O ASOCIACIONES CIVILES PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO PREVIO JUSTIFICATIVO

El presente estudio fue elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), por conducto de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y con la colaboración del Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR).





Figura 3. Vías de acceso a la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





Figura 4. Descripción limítrofe de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





II. EVALUACIÓN AMBIENTAL

A) DESCRIPCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS, ESPECIES O FENÓMENOS NATURALES QUE SE PRETENDEN PROTEGER

Debido a su ubicación geográfica, heterogeneidad y relieve de su territorio, México posee una amplia variedad de ecosistemas. En particular, la accidentada topografía del país favoreció el desarrollo de diversos humedales y cuerpos de agua como ríos, lagos, lagunas, ciénegas, cenotes, sistemas cavernícolas inundados, marismas, entre otros, que son poseedores de una rica biota que destaca por su alto porcentaje de especies endémicas (Aguilar, 2003; CONABIO, 2021a; 2022a).

Estos humedales representan ecotonos de transición entre elementos terrestres y acuáticos donde el agua es el principal factor que controla el ambiente y la biodiversidad asociada. En general presentan suelos inundados o saturados, ya que el manto freático está en o cerca de la superficie, existiendo humedales que pueden estar secos estacionalmente ante la ausencia de lluvias o porque han sido modificados por la actividad humana (Cowardin, *et al.*, 1979; SEMARNAT, 2012; CONANP, 2022a).

La importancia de estos ecosistemas radica en los múltiples servicios ambientales que proveen como el control de inundaciones, actuar como una barrera natural ante eventos hidrometeorológicos extremos, almacenamiento de agua, control de plagas, retención de suelos, control y estabilización de microclimas, provisión de alimentos, purificación de desechos, provisión de servicios estéticos y recreativos, entre muchos otros (SEMARNAT, 2012; CONABIO, 2021a).

En este sentido, las características hidrológicas de la península de Yucatán han dado lugar a la formación de sistemas limnológicos muy particulares que incluyen aguas expuestas y subterráneas de origen kárstico (de roca caliza), asociadas a estructuras derivadas de la disolución de la roca caliza como los cenotes (también llamados dolinas) y sus sistemas de cuevas subterráneas (secas e inundadas) (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1998; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Cenote El Aerolito

Actualmente en la península de Yucatán se han registrado 2,241 cenotes de un estimado de más de 5,000. Tan solo en Quintana Roo se calcula que existen más de 2,000 de estas formaciones, mismas que les confieren a las costas del Caribe mexicano uno de sus rasgos más característicos y de belleza escénica única, tanto en la superficie como en sus sistemas subterráneos asociados. Hasta hoy en Cozumel se tiene registro de 18 de estas formaciones, debido a su carácter costero y poca elevación sobre el nivel del mar, la mayoría de estos son de tipo cueva y están totalmente inundados. Existen otros cuerpos de agua interiores efímeros y someros conocidos como aguadas (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Álvarez-Legorreta, 2011; Calderón-Gutiérrez, 2013; Mejía-Ortíz *et al.*, 2022).

Los cenotes (del maya *ts'ono'ot* o *d'zonot*, que significa "caverna con depósito de agua") y sus aguas subterráneas tienen un papel ecológico fundamental al enlazar a los elementos bióticos y abióticos compartidos con el mar Caribe. La funcionalidad ecológica y biodiversidad de estos humedales no serían posibles sin los procesos y aportes de materia orgánica de los ecosistemas adyacentes, principalmente de las selvas y manglares (Ruíz-Cancino *et al.*, 2019; Mejía-Ortíz *et al.*, 2022).



Su formación se da a partir de procesos de dilución de rocas de carbonato de calcio por acción pluvial y corrientes de agua subterránea. Al filtrarse el agua de lluvia por el subsuelo se enriquece con dióxido de carbono (CO_2) tornándose ligeramente ácida y actuando a lo largo del tiempo como un agente erosivo de la roca caliza desgastándola y formando bóvedas inundadas de distintos tamaños y conformaciones, llegando un momento en el que el techo se adelgaza hasta colapsar dejando al descubierto total o parcialmente la parte inundada. En el apartado de Geología física de la zona, se describe con mayor detalle los procesos de formación y tipos de cenote (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1998; Tello y Castellanos, 2011).

Geológicamente, la isla de Cozumel forma parte de la placa que conforma la península de Yucatán, por lo que gran parte de su historia, rasgos y características geomorfológicas son compartidas (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007). Tal es el caso de las cuevas cársticas inundadas que cuentan con canales de drenaje y conductos subterráneos como el cenote El Aerolito, también conocido como Aerolito de Paraíso o sistema Purificación, principal objeto de conservación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito.

El cenote El Aerolito se clasifica como una cueva anquihalina, cuyas características principales son el presentar de forma subterránea una zona de encuentro e interacción entre las aguas epicontinentales dulces y las marinas saladas, además de gradientes de salinidad en sus conductos, conocidos como haloclinas y cuya profundidad depende de la distancia a la costa y la topografía propia del sistema (Pacheco y Vega, 2007; Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Mejía-Ortiz *et al.*, 2022) (Figura 5).

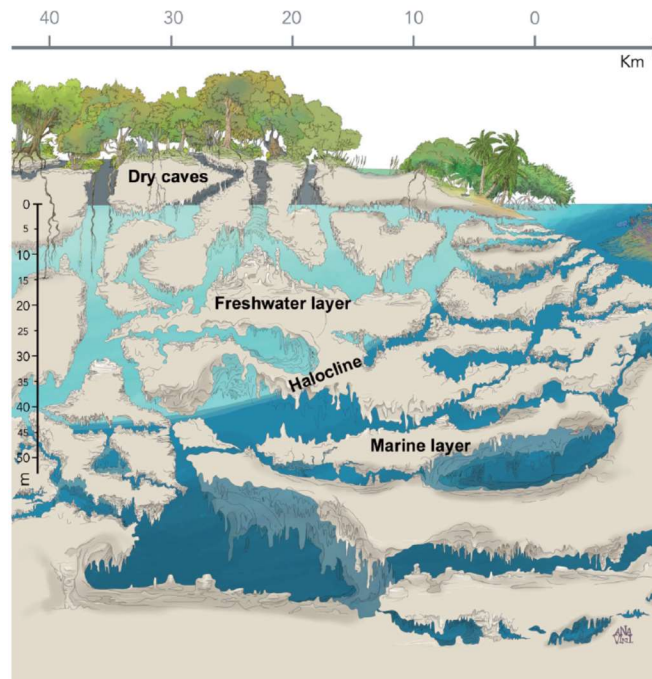


Figura 5. Perfil submarino esquemático de un sistema de cuevas anquihalinas donde se aprecia la relación (haloclina) entre el agua dulce (azul claro) y marina (azul oscuro), de acuerdo con la profundidad y distancia al mar. Las raíces de los árboles que llegan al acuífero mantienen el estado semiperennifolio de la vegetación de selvas tropicales y manglares. Tomado de Mejía-Ortiz *et al.*, (2022).





Holthuis (1973) definió los sistemas anquihalinos, como “*estanques sin conexión superficial con el mar, que contienen aguas saladas o salobres, que fluctúan con las mareas*”; este término fue ampliado por Stock et al. (1986) para incluir todos los “*cuerpos de agua salina, usualmente con una exposición restringida al aire libre, siempre con conexiones subterráneas con el mar más o menos extensivas, y mostrando notables influencias marinas, así como terrestres*”.

Ubicado en la costa occidental de la isla, el cenote El Aerolito tiene unas dimensiones de 68 m de largo, 25 m de ancho y 8 m de profundidad. La vegetación adyacente a la entrada se compone mayormente de selva baja subperennifolia, destacando en su extremo noroeste la asociación de mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Sus paredes y techo son hábitat de agregaciones de algas y tapetes bacterianos (Calderón-Gutiérrez, 2013) (Figura 6 y Figura 7).

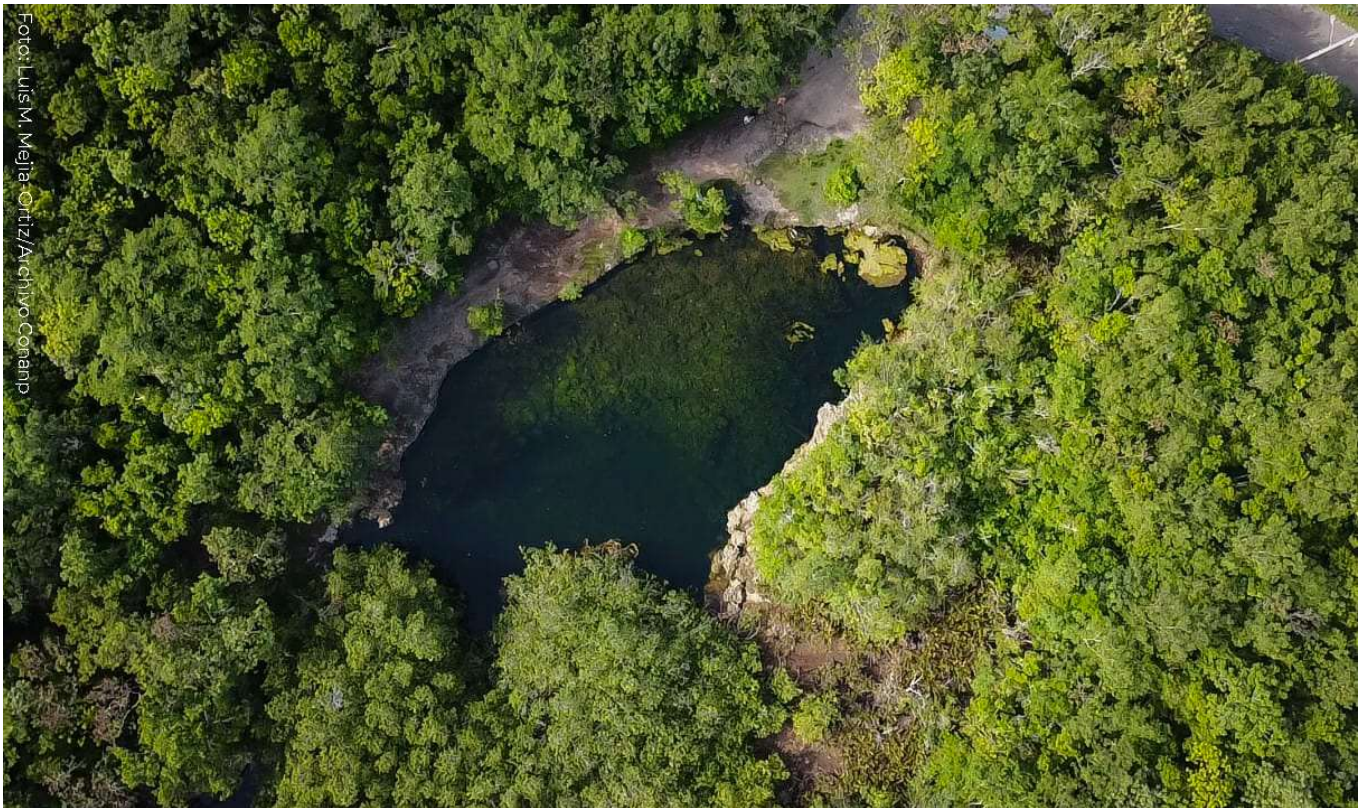


Foto: Luis M. Mejía Ortiz/Archivo Conanp

Figura 6. Vista aérea de la entrada al cenote El Aerolito. Se aprecian las asociaciones vegetales que lo rodean incluyendo selva baja subperennifolia y manglar.

El cenote El Aerolito está conectado con el mar Caribe a través de una cueva submarina de 240 m de longitud desde su entrada hasta la marina turística conocida como La Caleta, al sureste de la isla, a unos 100 m aproximadamente al sur del arrecife Paraíso. Junto con La Quebrada, son los dos únicos cenotes de la isla (de los 18 conocidos) de los que se tiene registrada una conexión hidrológica directa con el mar (INE-SEMARNAP, 1998; Yáñez-Mendoza et al., 2007; Frontana-Uribe y Solís-Weiss, 2011; Calderón-Gutiérrez, 2013) (Figura 8).





Foto: Luis M. Mejía-Ortiz/ArchivoConanp

Figura 7. Entrada al cenote El Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. Se observa la vegetación circundante asociada y su interacción con la apertura externa.

El sistema de cuevas y pasajes inundados asociados al cenote tiene una longitud explorada hasta ahora de unos 10,000 m. Cuenta con una profundidad promedio de 12 m y una máxima de 27 m. Sus conductos fueron formados principalmente por la disolución de la roca. Los espeleotemas como estalactitas y estalagmitas, así como columnas de la unión entre ambas (espeleotemas) se encuentran en las zonas profundas, a partir de los 7 m de profundidad, lo que indica que la cueva estuvo seca en algún momento. El sedimento es arcilla y barro (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013; Brankovits *et al.*, 2021; Mejía-Ortiz *et al.*, 2022) (Figura 9, Figura 10 y Figura 11).

Uno de los fenómenos naturales característicos del cenote es su haloclina. Esta se presenta a los 7 m de profundidad, sobre la cual hay agua salobre con una salinidad de 6 a 20 ups (unidades prácticas de medición), y debajo de ella se encuentra una capa de agua marina con hasta 37.5 ups. Al final de su pasaje principal, a una profundidad de 9 m, se encuentra una cámara que posee una clina sobre la cual existe agua sulfurosa, cuya concentración no ha sido estudiada (Mejía-Ortiz *et al.*, 2007a; Solís-Marín *et al.*, 2010; Calderón-Gutiérrez, 2013) (Figura 12).

Los valores de pH en el sistema son principalmente básicos (7.49-8.1), típico de cuerpos de agua de paisajes kársticos, con reserva alcalina alta y con predominio de carbonatos y bicarbonatos como sales amortiguadoras. Aunque el pH se puede modificar por reacciones de origen biológico (a mayor actividad fotosintética mayor pH), en sistemas con intrusión de agua de marina, como El Aerolito, los valores de pH básico se deben a la influencia de agua marina y no por la actividad biológica (Cervantes-Martínez, 2007).



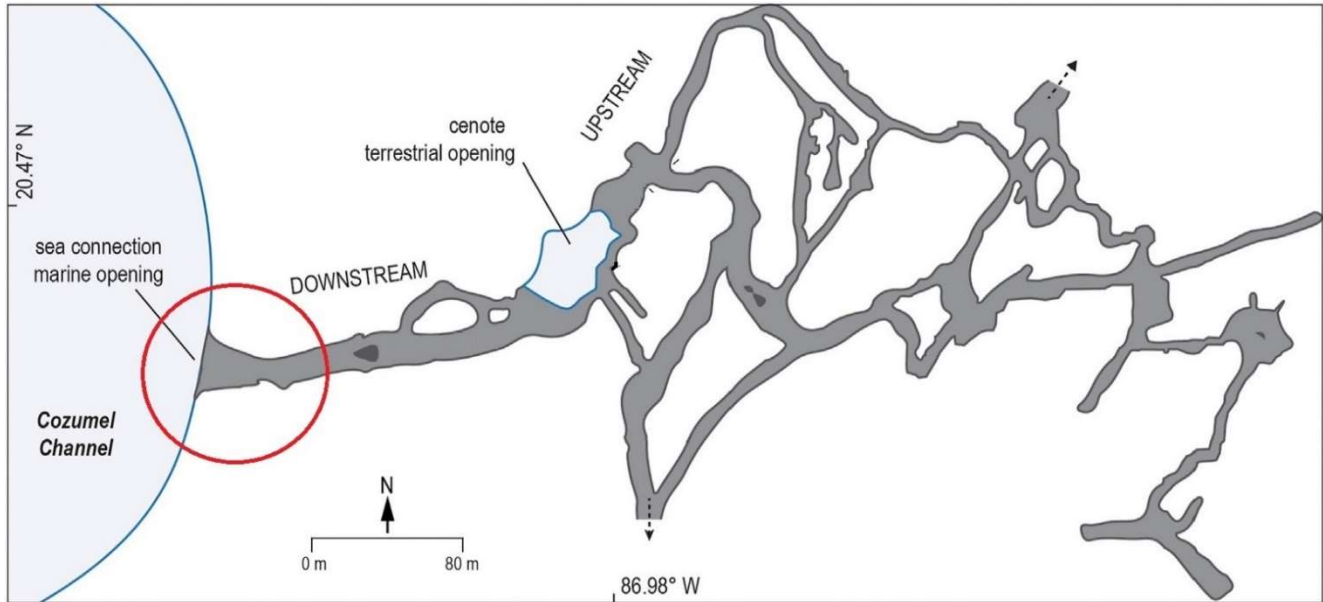


Figura 8. Mapa parcial del sistema de cuevas de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel. Ubicada por debajo del nivel del mar, esta red de cuevas transporta materiales y mantiene una conexión hidrológica interconectada entre el mar y el acuífero subterráneo (círculo rojo). Las flechas indican que el sistema continúa en esa dirección. Modificado de Brankovits et al. (2021).

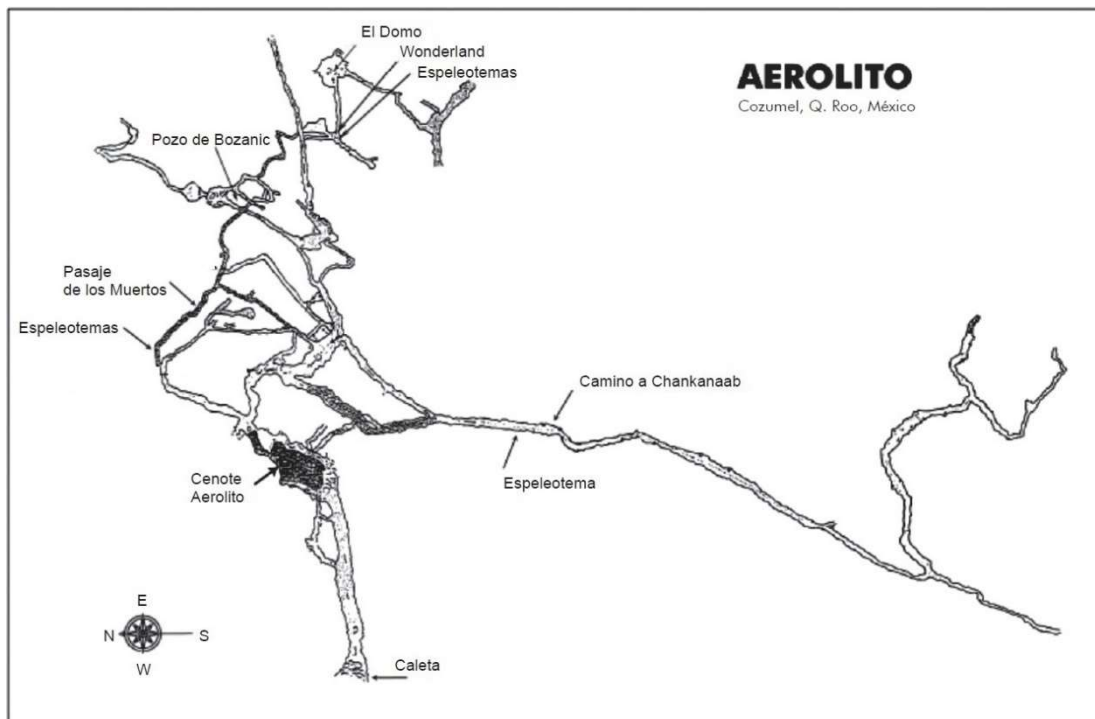


Figura 9. Mapa base del sistema de cavernas subterráneas del cenote El Aerolito. Se indican algunos de los principales espeleotemas (estalactitas o estalagmitas) y otras formaciones geológicas. Actualmente se han explorado alrededor de 10,000 m de pasajes y túneles. Entre los principales espeleobuzos e investigadores que han mapeado este sistema se encuentran Steve Ormeroid, Tom Morris, Jeff Bozanic, Germán Yáñez-Mendoza, Wes Skiles, Deniss Williams y Luis Mejía. Fuente: Yáñez-Mendoza et al. (2007).





Sistema kárstico de la propuesta de APFF Cenote Aerolito

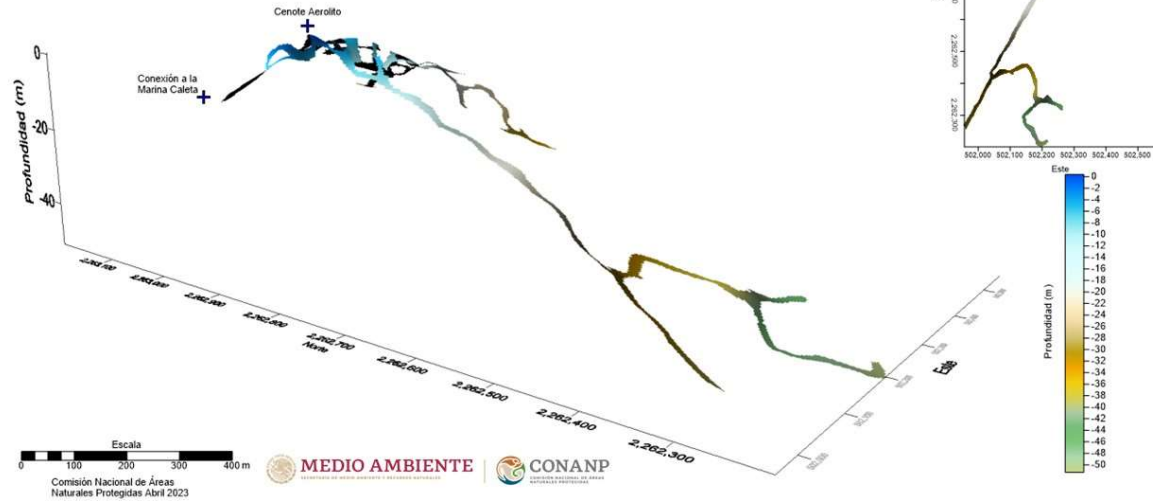


Figura 10. Esquema tridimensional del sistema de cavernas inundadas del cenote El Aerolito, Cozumel, Quintana Roo.



Foto: Lauren Miroult/Archivo Conanp

Figura 11. Vista del interior de una cámara inundada en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, se observan formaciones de estalactitas y estalagmitas, así como columnas de la unión entre ambas (espeleotemas). Estos rasgos geológicos se encuentran a partir de los 7 m de profundidad.





Figura 12. Pasaje en el cenote El Aerolito donde se observa una haloclina en la parte superior donde capas de la columna de agua no se mezclan dadas las diferencias en su salinidad.

Dinámica del ecosistema y patrones ecológicos

La mezcla subsuperficial de agua de mar y agua dulce de lluvia acumulada en suelos con carbonatos crea a través de miles de años estuarios o sistemas kársticos anquihalinos. La cantidad de energía que fluye en estos ecosistemas subterráneos es muy pequeña comparada con ecosistemas superficiales como selvas, bosques o arrecifes de coral. Esto ha llevado a enfocarse en entender los procesos de colonización y especiación en estos hábitats, los procesos biogeoquímicos y de flujo de energía, la interacción entre los componentes bióticos y abióticos, así como el impacto de las descargas de drenajes y contaminantes químicos, y que han sido temas escasamente estudiados (Barba-Macías y Palacios-Vargas, 1998; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019; Brankovits *et al.*, 2021).

A pesar de que en general los sistemas anquihalinos presentan altas salinidades en las áreas más profundas y las concentraciones de oxígeno disuelto son muy cercanas a la hipoxia (disminución del oxígeno disponible para las células de un organismo), la propuesta de APFF Cenote Aerolito alberga una alta y muy particular diversidad de especies anquihalinas, varias de ellas únicas en el mundo (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007).

Por ejemplo, en la mayoría de los sistemas subterráneos los crustáceos tienen la mayor riqueza y densidad, mientras que los equinodermos no se presentan o se encuentran en densidades extremadamente bajas. Sin embargo, en el cenote El Aerolito sucede todo lo contrario y las densidades de crustáceos son muy bajas, mientras que las de equinodermos son muy altas, al grado que hasta el momento es la cueva con mayor diversidad de equinodermos en el mundo, con más de 20 especies, incluyendo dos especies endémicas cuyo único hábitat es este sistema, la estrella de mar cavernícola





(*Copidaster cavernicola*) y el ofiuero (*Ophionereis commutabilis*). Además, la especie dominante en el sistema es otro ofiuero (*Ophionereis reticulata*) (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2013).

La alta biodiversidad y abundancia del sistema subterráneo del cenote El Aerolito puede explicarse por la convergencia de diversos factores físicos y ecológicos tanto en su parte externa como subterránea, y que lo hacen único en el planeta:

a) Polinizadores y dispersores

Uno de los primeros eslabones que sostiene al tan particular sistema kárstico del cenote El Aerolito, es la polinización y aprovechamiento de recursos florales y frutales de la selva y el manglar alrededor de su entrada. Este es uno de los procesos biológicos más importantes al tratarse de una interacción indispensable para el mantenimiento de la biodiversidad y los procesos evolutivos de muchas especies, de hecho, los polinizadores son una determinante clave en la evolución floral a escala global (Mendoza, 2011; Morales-Contreras *et al.*, 2020; SADER-SEMARNAT, 2021).

La polinización representa un proceso que mantiene la función y permanencia ecosistémica a largo plazo. Su importancia se ve reflejada en los diversos indicadores de cambio climático, de pérdida de biodiversidad, de salud ecosistémica y en las implicaciones económicas y sociales que tendría una disminución o pérdida del proceso (SADER-SEMARNAT, 2021).

Debido a lo anterior, la protección de los polinizadores y dispersores de semillas de diversas especies vegetales en la propuesta de ANP, principalmente colibríes y murciélagos, es relevante dado que ellos son los responsables de polinizar la vegetación aledaña al cenote, misma que a través de sus aportaciones de materia orgánica (hojarasca y detritus), mantiene la viabilidad del ecosistema subterráneo (Mendoza, 2011; Calderón-Gutiérrez, 2013; Rincón, 2013; Morales-Contreras *et al.*, 2020).

El conocimiento de la riqueza e identidad de los recursos florales utilizados por los polinizadores es fundamental para identificar su grado de especialización trófica y su vulnerabilidad ante perturbaciones naturales y antropogénicas, especialmente en especies endémicas con una distribución geográfica altamente restringida como el colibrí esmeralda de Cozumel (*Cynanthus forficatus*), que solo habita en la isla y es una de las 14 especies de colibríes endémicas de México. Esta especie es un polinizador floral generalista de la selva y manglar que rodea al cenote El Aerolito (Morales-Contreras *et al.*, 2020).

Por otro lado, los murciélagos juegan un rol ecológico muy importante en la estructura y función de las islas, al polinizar, dispersar germoplasma y ser un control natural de plagas. En Cozumel, uno de los hábitats con mayor actividad de este grupo de mamíferos son los cenotes (incluyendo El Aerolito), por encima del manglar y la selva mediana, y en los cuales se han registrado al menos ocho especies insectívoras e importantes especies frugívoras y dispersoras de semillas como el murciélago frutero (*Artibeus jamaicensis*) (Mendoza, 2011; Rincón, 2013).

Generar la información y conocer el estado de las poblaciones de polinizadores y dispersores de semillas que sostienen a la vegetación circundante al cenote es primordial en las estrategias de conservación y manejo de la eventual ANP APFF Cenote Aerolito (Mendoza, 2011; Rincón, 2013; Morales-Contreras *et al.*, 2020).





b) Vegetación superficial (manglar) y tapetes bacterianos

El tipo de vegetación superficial y la presencia de aperturas terrestres son los elementos clave que regulan los aportes de partículas de materia orgánica a los sumideros costeros, misma que se dispersa hasta las zonas oligotróficas (con muy bajos niveles de nutrientes) y al océano por flujos de agua subterránea, influyendo de forma muy clara en la biogeoquímica del sistema subterráneo y ecosistemas costeros aledaños (Coutino *et al.*, 2020; Brankovits *et al.*, 2021).

La evidencia cuantitativa de este transporte hidrológico se conoce a través del registro de los patrones de sedimentación interna en los últimos 1,000 años, lo que muestra la importancia del intercambio y exportación de materia orgánica terrestre desde los manglares hasta la costa a través de redes de cuevas, además del registro de patrones ambientales y eventos como huracanes y tormentas tropicales. Estos aportes de materia orgánica son de suma importancia para los sistemas arrecifales y pastos marinos, este caso los aportes del cenote El Aerolito se dispersan hacia el arrecife conocido como Paraíso en la costa sureste de Cozumel, a pocos cientos de metros de su entrada submarina en La Caleta (INE-SEMARNAP, 1998; Brankovits *et al.*, 2021).

En el caso del cenote El Aerolito la conexión física en su entrada con el mangle rojo (*Rhizophora mangle*) cumple esta función ya que introduce a través de su apertura externa una gran cantidad de materia orgánica y detritus al sistema (Calderón-Gutiérrez, 2013; Brankovits *et al.*, 2021).

Estos suministros de origen terrestre y su acumulación continua promueven subhábitats eutróficos (ricos en nutrientes y minerales). Estos sitios contienen grandes acumulaciones de materia orgánica ideales para el desarrollo de tapetes bacterianos y de algas que la consumen. En el cenote El Aerolito estas agregaciones se encuentran principalmente en las paredes y techo de la zona salobre, la más propicia para su crecimiento. En contraste, las áreas oligotróficas del sistema se encuentran en las cuevas más distantes de la apertura y sin conectividad a la superficie (Calderón-Gutiérrez, 2013; Brankovits *et al.*, 2021) (Figura 13).

Continuando con el flujo de energía a través del sistema, en las secciones con haloclina, algunos de estos tapetes bacterianos caen a la zona marina aportando suficiente materia orgánica y energía para sostener a la biota cavernícola, principalmente macroinvertebrados. Esta "lluvia" de nutrientes también explica la variación de riqueza y densidad entre sitios con diversas profundidades, ya que los sitios someros presentan haloclina, y por lo tanto tienen un aporte importante de bacterias, mientras que los sitios profundos no presentan haloclina (no presentándose el agua salobre), la cantidad de alimento es mucho más limitada, restringiendo así el número de especies y la densidad de organismos, sumado a un menor contenido de oxígeno consecuencia de procesos biológicos que demandan un alto consumo del mismo, como lo es la degradación de materia orgánica (Mejía-Ortiz, *et al.*, 2006; Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013).





Foto: Luis M. Mejía-Ortiz/Archivo Conanp

Figura 13. Manglar asociado a la apertura y tapetes bacterianos y de algas en las paredes del cenote El Aerolito. Ambos elementos constituyen las principales fuentes de materia orgánica y energía que sostienen el funcionamiento del ecosistema subterráneo y su gran diversidad de especies anquihalinas.

c) Conexión con el mar y flujos hídricos

Su cercana conexión con el mar Caribe (240 m) hace que sus aguas superficiales sean dulce salobres (aguas polihalinas), lo que es propio de humedales que aún se encuentran dentro de la zona de mezcla aguas epicontinentales y marinas, que se extiende hasta cierta distancia tierra adentro, mientras que la presencia de aguas de mar (aguas euhalinas) se da en la capa por debajo de los 7 m de profundidad. La profundidad y amplitud de la haloclina y los gradientes de salinidad también varían de acuerdo con las características geomorfológicas del cenote y la distancia a la costa (Yáñez-Mendoza et al., 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Asimismo, este vínculo con aguas marinas propicia un intercambio e interacción de flujos hídricos que, debido a la amplia sección transversal del conducto, el bajo gradiente hidráulico, las velocidades observadas, y la elevada densidad y viscosidad de las dos masas de agua, se llevan a cabo mediante lentos procesos a manera de difusión, lo que evita turbulencias por lo que las columnas de agua no se mezclan y la salinidad del agua de la superficie en los conductos se mantiene relativamente salobre a cierta distancia tierra adentro (<10% salinidad marina a 1 km) (Yáñez-Mendoza et al., 2007).

La conjunción de diversas características geológicas, químicas y biológicas hace que en el cenote El Aerolito se presenten procesos biogeoquímicos únicos, que se detonan con el aporte de materia orgánica terrestre desde el manglar y vegetación adyacente, dinámica que a su vez está vinculada con otros procesos ecológicos en la superficie como la floración y polinización. La dinámica y procesos de acumulación de materia orgánica en el cenote El Aerolito se esquematizan en la Figura 14.



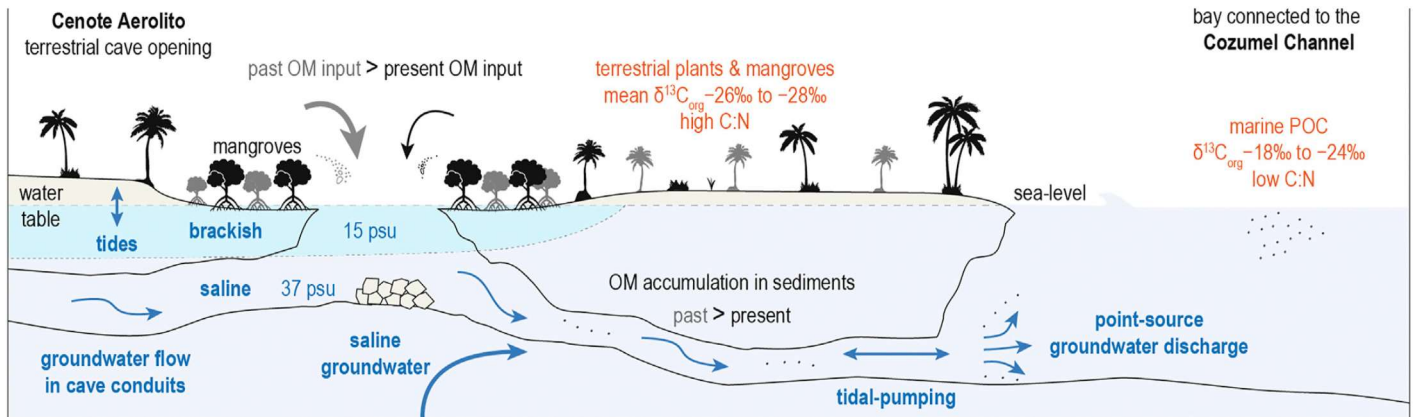


Figura 14. Modelo conceptual a nivel de paisaje de la dinámica de la materia orgánica (MO) en el sistema kárstico de APFF Cenote Aerolito. Los flujos hídricos a través de conductos (flechas azules) aceleran el transporte e intercambio de material entre los ambientes terrestre y marino. Estos procesos se amplifican con eventos hidrometeorológicos extremos (huracanes). Los aportes de MO del manglar y la vegetación terrestre al cenote fueron mayores en el pasado (flecha gris) que los que se dan actualmente (flecha negra), lo que resulta en una disminución de la MO acumulada en la cueva a lo largo del tiempo. La variación en las entradas y acumulación de MO cerca de la apertura ha provocado cambios en las condiciones biogeoquímicas del sistema y en sus comunidades bentónicas. La mayor acumulación de MO terrestre cerca de la apertura marina proviene de material persistente hacia el mar transportado durante los últimos 1,000 años. Tomado de Brankovits et al. (2021).

En resumen, los principales patrones ecológicos relacionados con la riqueza de especies, composición taxonómica y densidad en el APFF Cenote Aerolito son (Calderón-Gutiérrez et al., 2018) (Figura 15):

- 1) **Tipo de conexión con el mar.** Las cuevas con conexión directa al mar tienen una mayor riqueza y diversidad ya que hay un flujo constante de organismos, incluidos estadios larvales, aumentando la riqueza por la combinación de fauna estigoxena, estigofolia y estigobia. Este patrón también explica la mayor riqueza en cuevas marinas en comparación con cuevas anquialinas. Además, este vínculo directo con el mar facilita la entrada de fuentes de energía al sistema incluyendo materia orgánica disuelta, detritus y plancton.
- 2) **Distancia al mar.** La riqueza de especies disminuye a medida que la distancia al mar aumenta, incluso dentro de la misma cueva. Con el aumento de la distancia lineal, la cantidad de materia orgánica disponible se reduce, disminuyendo la riqueza de especies y su densidad.
- 3) **Disminución batimétrica.** La riqueza de especies disminuye a medida que aumenta la profundidad de la cueva. Esto es consecuencia de la reducción en el transporte de materia orgánica a zonas más profundas, partes de la cueva, análogas a las zonas profundas marinas. La reducción de la riqueza y la densidad se produce con la distancia horizontal y la profundidad del agua.
- 4) **Haloclina.** La presencia de una haloclina aumenta considerablemente la riqueza de especies. Debido a la geomorfología de las cuevas anquialinas, no todas las secciones tienen haloclina, especialmente en los pasajes con alturas bajas de piso a techo. Esto provoca una disminución drástica en la riqueza y densidad de especies dado que la biota no tiene acceso a múltiples capas de agua.
- 5) **Profundidad de la haloclina.** La riqueza de especies disminuye en áreas donde la haloclina se encuentra cerca del fondo. En caso de un aumento en la profundidad de la haloclina (por ejemplo, por mareas o tormentas), la biota estaría expuesta a un estrés térmico y osmótico



abrupto. Estas cuevas están influenciadas por el régimen de mareas, de tal manera que los cambios de profundidad de la haloclina están relacionados estos y con la distancia a la costa.

- 6) **Geomorfología de la cueva.** La riqueza y diversidad de especies puede cambiar dramáticamente en las cuevas debido a la presencia de barreras o discontinuidades en sus diferentes estructuras (Figura 16). Esto puede deberse a zonas secas o por una restricción a una sola capa de agua, resultante de la geomorfología, aunque ambas capas estén presentes en la siguiente sección.
- 7) **Ecosistemas colindantes.** Los ecosistemas que interactúan directamente con el sistema anquiahilino, particularmente en sus entradas, determinan la cantidad y calidad de la materia orgánica, así como el tipo de fauna que accede a la cueva. Existe una mayor riqueza y densidad de especies en cuevas que están conectadas con ecosistemas exportadores de energía, como los manglares, así como como en aquellas cuevas con conexiones al mar o a la superficie terrestre.

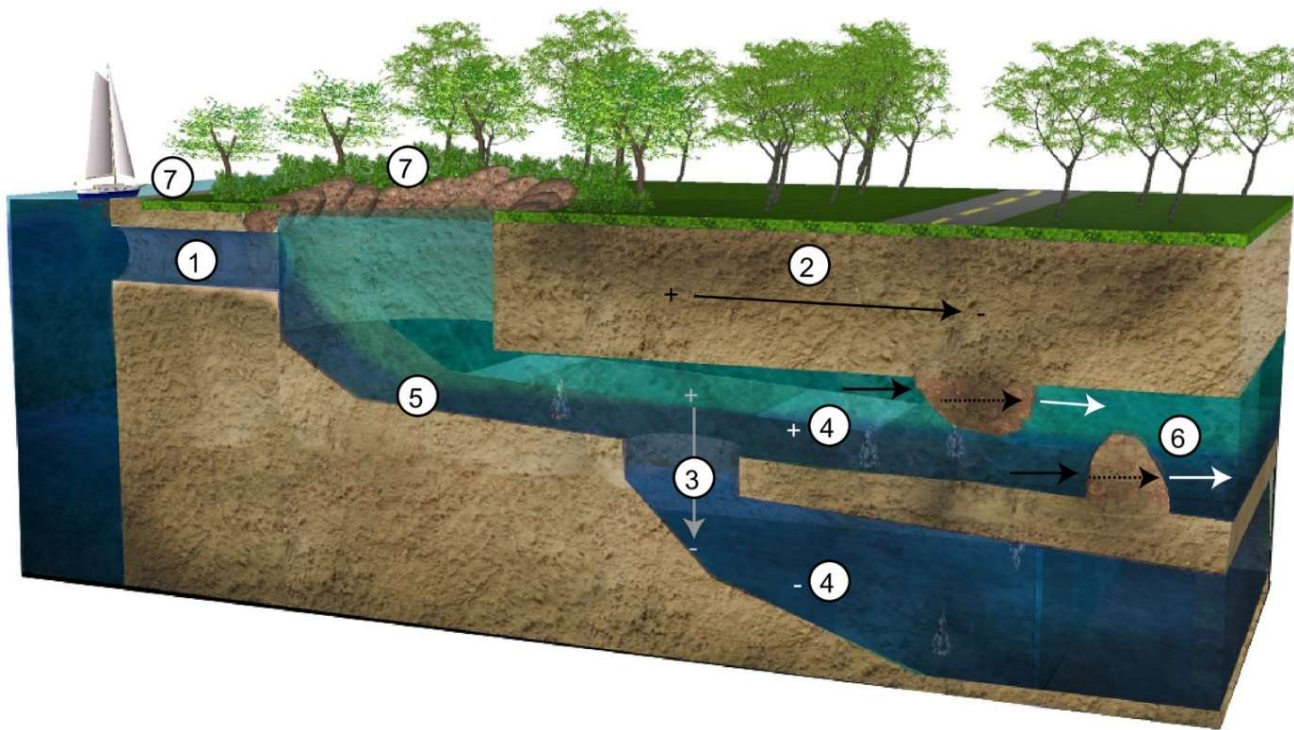


Figura 15. Diagrama explicativo de los patrones ecológicos en cuanto a la riqueza de especies, composición taxonómica y densidad esperada en el cenote el Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. 1) Aumento en cuevas con conexión al mar. 2) Disminución a medida que aumenta la distancia al mar. 3) Disminución en zonas más profundas. 4) Disminución de áreas sin haloclina. 5) Disminución en áreas donde la haloclina está cerca del fondo. 6) La riqueza y diversidad de especies puede cambiar drásticamente debido a discontinuidades geomorfológicas. 7) Los ecosistemas colindantes determinan la cantidad y calidad de materia orgánica disponible en la cueva. Tomado de Calderón-Gutiérrez, et al. (2018).



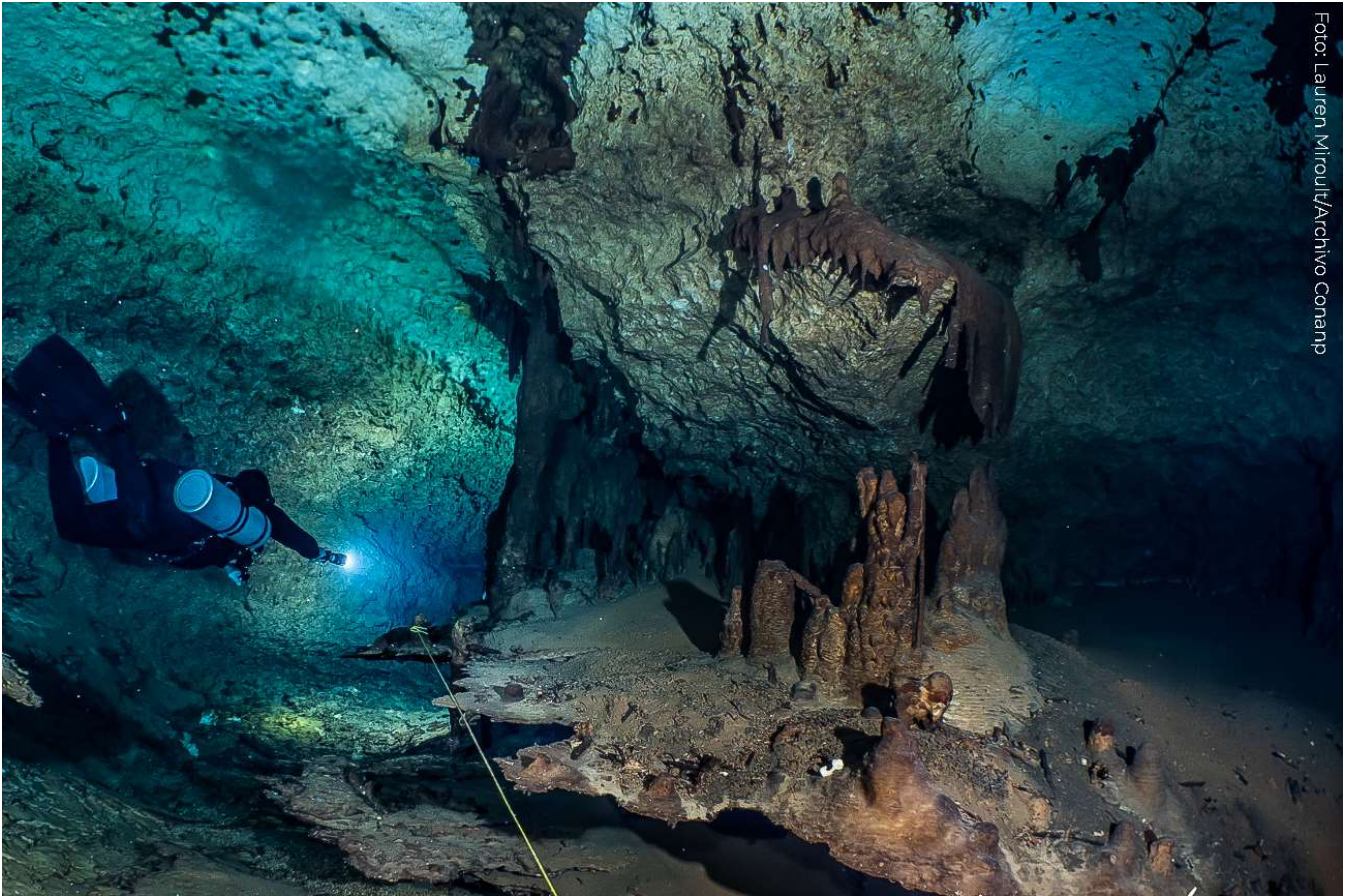


Foto: Lauren Mirouli/Archivo Conanp

Figura 16. Una de las cámaras del cenote El Aerolito. Se aprecian las diferentes estructuras características de la geomorfología de las cuevas inundadas como túneles y pasadizos, además de espeleotemas como estalactitas y estalagmitas. Estas barreras y discontinuidades físicas pueden tener una gran influencia en la riqueza y diversidad de especies al interior del sistema, con variaciones en la composición de la biota cavernícola incluso de una cámara a otra.

Biodiversidad

Por sus características morfológicas y geológicas, este humedal constituye uno de los más importantes reservorios de biodiversidad cavernícola, no solo de México, si no del mundo. En términos generales dentro de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado 293 especies nativas, de las cuales 60 son especies vegetales, 162 vertebrados, un tunicado y 70 macroinvertebrados (Anexo 1). Estos registros representan solo una aproximación de la diversidad de organismos que pueden estar presentes en la zona de interés, por lo que el número de especies, sobre todo de fauna cavernícola, puede incrementarse con el registro de nuevas especies aún desconocidas para la ciencia.

Entre las especies registradas en la zona, destaca la presencia de una especie vegetal y 24 animales incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Anexo 2). Asimismo, se han registrado 27 endemismos y microendemismos, incluyendo especies que únicamente se han registrado en el cenote El Aerolito como la estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*), única estrella de mar en el mundo que habita sistemas cavernícolas, el ofiuero (*Ophionereis commutabilis*) o la desmoesponja (*Amphibleptula aaktun*). Además, se han registrado siete especies prioritarias conforme al Acuerdo





por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de marzo de 2014.

Dada esta riqueza biológica y considerando los patrones sociales y económicos que están directamente ligados con los recursos hídricos, la propuesta de ANP se encuentra incluida totalmente en la Región Hidrológica Prioritaria (RHP) 106. Cozumel, una de las 110 RHP del país identificadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Arriaga et al., 2002).

Servicios ambientales

Conforme a lo descrito anteriormente, la declaratoria del ANP, adquiere mayor relevancia si se considera el conjunto de servicios ambientales o ecosistémicos que proporciona a una de las zonas turísticas más visitadas del mundo, especialmente los servicios de provisión y regulación hídrica, toda vez que en ella se conjugan diversos beneficios tangibles e intangibles generados por los ecosistemas y su biodiversidad, y que son necesarios para la supervivencia de los sistemas naturales y biológicos intrínsecamente relacionados, que proporcionan múltiples beneficios al ser humano, ya sea como servicios de provisión, regulación, soporte o culturales (Tabla 2) (CONANP-PNUD, 2019).

Tabla 2. Servicios ambientales o ecosistémicos. Bienes y procesos naturales de los cuales dependemos para sobrevivir. Fuente: CONANP-PNUD, 2019.

SERVICIOS AMBIENTALES				
PROVISIÓN	REGULACIÓN		SOPORTE	CULTURA
<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos • Ganado • Pesquerías • Acuicultura • Agua • Madera y leña • Alimentos • Materias primas • Bioquímicos y principios activos • Medicamentos 	<i>Ámbito regional y local</i> <ul style="list-style-type: none"> • Control de eventos hidrometeorológicos extremos (tormentas y huracanes) • Control de plagas • Regulación y saneamiento del agua • Control de erosión de suelos • Regulación de enfermedades y agentes infecciosos • Polinización 	<i>Ámbito global</i> <ul style="list-style-type: none"> • Regulación del clima • Regulación de la calidad del aire 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de suelos • Reciclaje de nutrientes • Producción primaria 	<ul style="list-style-type: none"> • Recreación y turismo • Valores espirituales y religiosos • Valores estéticos, inspirativos y educativos • Identidad del sitio • Herencia y patrimonio cultural

Esta relevancia aumenta significativamente en el contexto de cambio climático, ya que las ANP funcionan como una barrera ante sus efectos, lo que las hace ser un factor importante en la disminución de los impactos negativos en los ecosistemas, su biodiversidad y las comunidades humanas que dependen de ellos (CONANP, 2015).

Como la mayoría de los humedales, el cenote El Aerolito es un ambiente caracterizado por su alta productividad y donde se desarrollan complejos y dinámicos procesos naturales, cuyo equilibrio y preservación son fundamentales para la existencia de poblaciones de especies únicas que es necesario conservar. De manera general, en la Figura 17 se muestran los principales objetos de conservación que se protegerán con la eventual ANP y que incluyen elementos bióticos como manglar, tapetes bacterianos, zonas de agregación y registro de especies cavernícolas y endémicas





(especialmente equinodermos); así como abióticos como las zonas de haloclinas, cuevas y bóvedas, pasajes y espeleotemas como estalactitas y estalagmitas.

Así, la propuesta de ANP garantizará la continuidad de los procesos biogeoquímicos del cenote El Aerolito, mediante el diseño y fortalecimiento de acciones que favorezcan la conectividad entre los paisajes y ecosistemas terrestres y marinos, a través de un sistema de ANP de carácter federal y local que permitirá la movilidad de la biodiversidad entre sitios con las características ecológicas y biológicas adecuadas para su supervivencia. Las ANP constituyen la estrategia de gestión más efectiva para impedir el cambio de uso de suelo, con lo que se evita la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera (CONANP, 2015).

A pesar de las fuertes presiones antropogénicas que históricamente han impactado a la zona de interés, principalmente por el desarrollo de infraestructura turística, con la consecuente modificación del paisaje y contaminación del humedal, esta es una zona de alta biodiversidad, endemismos y especies nuevas para la ciencia. Su conservación garantizará la protección de un ecosistema único en el mundo desde muchos aspectos biológicos y ecológicos.

Bajo esta perspectiva, una de las estrategias para el mantenimiento de los humedales es la conservación y manejo sustentable de áreas vinculadas por los procesos clave del ciclo del agua. El bienestar social y económico de un país depende, en gran medida, de la capacidad que tienen estos ecosistemas acuáticos de seguir brindando sus servicios ambientales; de ahí la importancia de que su uso sea racional y sustentable (Aguilar, 2003; CONABIO, 2021a).





Figura 17. Objetos de conservación, bióticos y abióticos del sistema de cavernas del cenote El Aerolito con respecto a la poligonal propuesta para el ANP.





1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

1.1 FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA

La propuesta de APFF Cenote Aerolito se ubica dentro de la provincia fisiográfica Península de Yucatán y a su vez en la subprovincia del Carso Yucateco. La provincia se ubica al sureste de México donde el terreno es predominantemente plano. Fisiográficamente es una gran plataforma de rocas calcáreas emergida del fondo marino desde hace millones de años (CONAGUA, 2020).

La península de Yucatán es una plataforma masiva de calizas horizontalmente estratificadas. Esta subdividida en dos subprovincias o regiones fisiográficas: una planicie al norte denominada Carso Yucateco y otra región de colinas al sur que se extiende hasta el norte de Guatemala denominada Carso y lomeríos de Campeche (CONAGUA, 2020) (Figura 18).

Específicamente en la zona del Carso Yucateco, que incluye la isla de Cozumel, no existe drenaje superficial, toda el agua de lluvia que no se evapora en la superficie del terreno se infiltra a través de cenotes y otras aberturas que se encuentran en el terreno rocoso. En la isla de Cozumel, predominan las planicies con suelos Leptosoles asociados a Arenosoles y Solonchak en la zona de costas, y a gleysoles y regosoles al interior donde predominan planicies y mesetas kársticas.

Dadas las características geológicas de Cozumel, con karst como componente principal de su superficie, a través de procesos de erosión hídrica se ha formado una extensa red de cuevas y cavernas subterráneas, la mayoría de ellas inundadas de tipo anquihalinas dada su cercanía al mar, y en el caso del cenote El Aerolito su conexión directa a la costa (Mejía-Ortiz *et al.*, 2007a).

1.1.1 TOPOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La topografía y geomorfología de la zona donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito, está representada en una sola geofoma que es el relieve kárstico denudatorio, la cual es una planicie calcárea que alcanza 1 a 2 msnm con un micro relieve de ondulaciones que presenta procesos denudativos conforme se acerca a la costa, donde se encuentra con la costa biogénica de arrecife coralino, en el litoral central desde Playa Corona hasta la localidad de San Miguel de Cozumel (SEDESOL, 2011) (Figura 19).



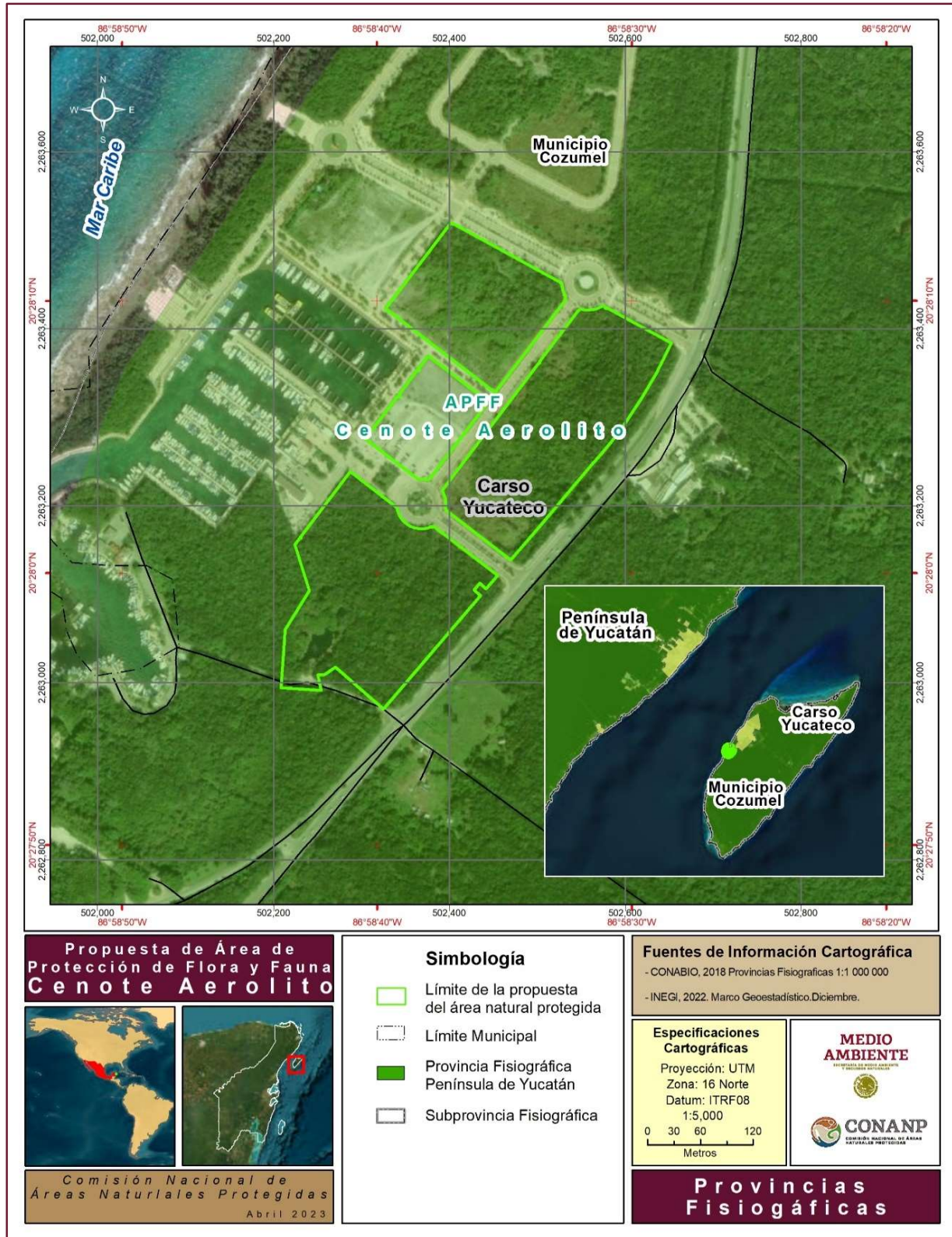


Figura 18. Fisiografía de la zona donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





Figura 19. Geomorfología de la zona donde se ubica propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. La topografía y geomorfología de la zona es de relieve kárstico y corresponde a una planicie calcárea.





1.2 GEOLOGÍA FÍSICA E HISTÓRICA

La geología de la isla de Cozumel es similar a la que se encuentra en toda la península de Yucatán, la cual se caracteriza por una gran planicie de pendiente muy suave y poca altitud en la zona de Quintana Roo y que comprende un paquete de rocas carbonatadas, que abarcan desde el Cretácico al Reciente. Los estudios que se han realizado coinciden en señalar una sedimentación de los fondos marinos a partir de la Era Terciaria, sobre un basamento de rocas de la Era Secundaria, lo que ha originado una gigantesca losa que empezó a ascender a pausas y retrocesos hasta fines de la Era Cenozoica, continuando hasta nuestros días en la parte norte. Esta losa se constituye de calizas granulosas, deleznales, color blanquecino llamadas sascab (SGM, 2006).

Estratigráficamente se ubica dentro de la provincia denominada Plataforma de Yucatán, que comprende un paquete de rocas carbonatadas, que abarcan desde Cretácico reciente. La unidad más antigua expuesta es la Formación Carrillo Puerto (TmplCz-Cq), constituida por una secuencia de caliza y coquina de edad del Mioceno- plioceno que se distribuye en toda la isla y aflora en mayor proporción en el centro y sur de la isla (Figura 20).

Cubriendo esta unidad anterior, sin tener incidencia en la zona donde se ubica la propuesta de ANP, hacia la zona costas y zonas palustres, se desarrollaron depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, constituida por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita de edad del Pleistoceno (Qpt(¿)Ar) (SGM, 2006).

Las rocas más antiguas en la zona son calizas y dolomías del Mioceno, muy compactas, de estratificación delgada y espesor total desconocido las cuales no afloran en la isla. Las formaciones correspondientes al Mioceno-Plioceno son calizas y lodolitas arenosas, con espesor total de unos 30 m y expuestas en el borde noroccidental de la isla; calizas calcarenitas y arenas calcáreas de coloración crema con fósiles, algunas masivas y otras estratificadas, cuyo espesor total es del orden de 10 m y que conforman el afloramiento más extenso; calizas y sedimentos calcáreos semicompactos de color crema, estratificados, que tienen espesor de unos 10 m, y que afloran en la faja costera oriental. Las rocas más jóvenes dentro de la isla datan del Cuaternario y están representadas por gravas y arenas calcáreas, calcarenitas y fragmentos de conchas depositadas en forma discontinua a lo largo del litoral, y sedimentos de pantano depositados en las áreas costera norte y sur, inundadas por agua salobre (SGM 2006).

La isla de Cozumel constituye la parte emergida de un pilar estructural (horst), limitado por dos grandes fallas normales paralelas al litoral oriental de la Península.

En relación con la formación de las cuevas o sistemas kársticos, estos se forman por procesos geoquímicos de disolución de la roca caliza generado por el contacto entre el ácido carbónico que contiene el agua de lluvia y el calcio de la roca caliza, de esta forma se originan las cavidades subterráneas que después de miles de años de erosión hídrica se colapsan formando depresiones llamadas dolinas; estas formaciones son conocidas regionalmente como reholladas o sumideros cuando no poseen agua, y se les llama cenotes cuando el agua es visible (CONANP, 2022b) (Figura 21).





Figura 20. Geología de la zona donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.



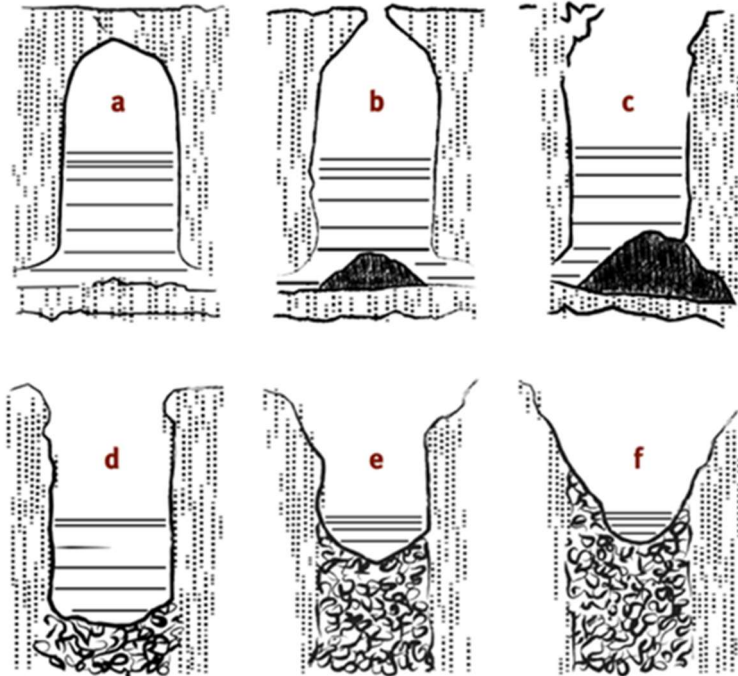


Figura 21. Proceso en la formación de un cenote: primero como una caverna abovedada (a), cuyo techo con el paso del tiempo se empieza a desprender debido a la gravedad (b). Conforme pasa el tiempo, la boca se hace más ancha por la acción de la gravedad y la erosión (c), hasta que desaparece el techo (d). Cuando esto sucede, el cenote se empieza a azolvar por la acumulación de material y, finalmente, con el desgaste de las paredes se presenta como una formación hundida (Montero, 2013).

1.3 TIPOS DE SUELOS

La zona donde se ubica la propuesta de ANP es una transición de la unidad cuaternaria de suelos residuales y la plataforma calcárea, por lo que predominan suelos de tipo Leptosol con diferentes niveles de conservación ya que se encuentran rodeados de selvas, áreas urbanas e infraestructura de la localidad Cozumel que los ha degradado paulatinamente (WRB, 2022).

Con base en la Base Referencial del Recurso Suelo (WRB, 2022) en la zona donde se ubica la propuesta de ANP los suelos son de tipo:

Leptosol: se ubican en la zona este de la propuesta de ANP y comprenden suelos muy delgados asentados sobre roca continua caliza y suelos que son extremadamente ricos en fragmentos gruesos. Los Leptosoles se encuentran particularmente en áreas intensamente erosionadas y tienen roca continua en o muy cerca de la superficie o son extremadamente pedregosos.

En la zona de interés, donde hay material calcáreo pertenecen a las Rendzinas, estos son poco profundos y de desarrollo moderado, tienen limitante física a menos de 50 cm de profundidad, lítica o petrocálica (caliche), así como un horizonte superficial (horizonte A mólico) que descansa sobre material calcáreo. Presentan color oscuro o pardo rojizo, con alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente alcalino, con predominio de la textura fina (arcillosa) y algunos con textura media. El contenido de materia orgánica es alto debido a la abundante vegetación que desarrollan, esta materia orgánica se acumula en las zonas de hondonadas formando un suelo altamente fértil (Figura 22).



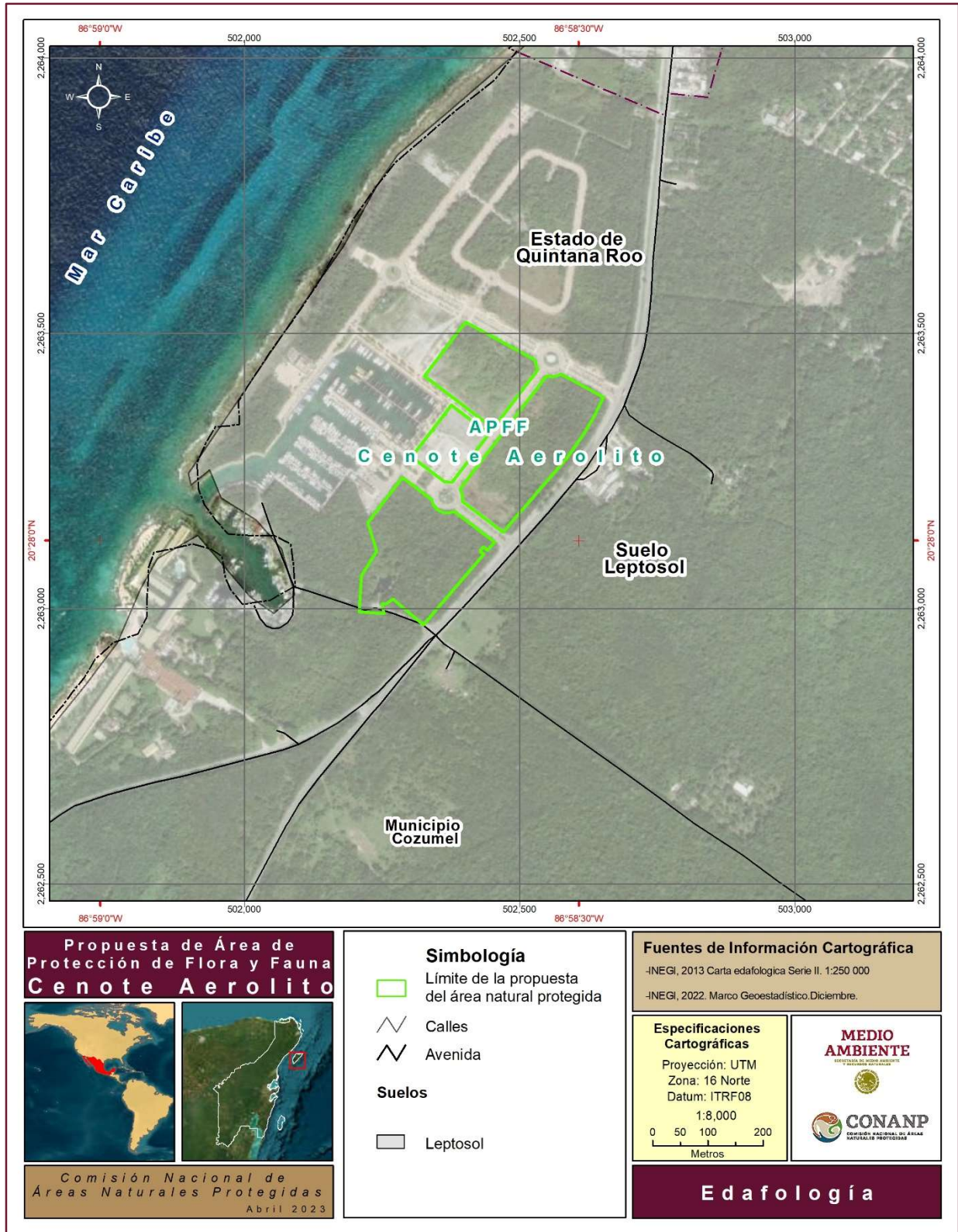


Figura 22. Edafología de la zona donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





1.4 HIDROLOGÍA

La propuesta de APFF Cenote Aerolito se ubica en la región hidrológica Yucatán Norte (32), perteneciente administrativamente al Organismo de Cuenca Península de Yucatán, abarca los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo incluyendo a la isla Cozumel (CONAGUA, 2020).

Debido a las características topográficas planas e hidráulicas y la alta permeabilidad que predominan en la isla, no se han desarrollado drenajes que se pudieran considerar como corrientes superficiales propiamente dicho. El agua que se precipita en la superficie se infiltra rápidamente o se acumula en las zonas de inundación, al norte y sur de la isla o en pequeños estanques temporales. El agua aprovechable en esta Unidad Hidrogeológica está alojada en las rocas carbonatadas de las formaciones Chankanaab y Abrigo: calizas fosilíferas, calcarenitas y areniscas calcáreas, que datan del Terciario. La primera de ellas, con un espesor medio de 20 m constituyen la porción inferior del acuífero y, prácticamente no está expuesta: la formación Abrigo, con espesor de unos 9 m, aloja la parte superior del acuífero y aflora en la mayor parte de la isla. En las fajas costeras norte, oriental y sur de la misma, el acuífero está cubierto por las calizas de la formación Mirador y localmente por sedimentos del Reciente (CONAGUA, 2020).

El “Acuífero dulce”, al centro de la isla, está limitado superiormente por la superficie freática, inferiormente por la zona de transición que se forma en los sistemas insulares o costeros por la mezcla del agua dulce y el agua marina, y lateralmente por el litoral (al poniente) y por la Formación Mirador (al norte sur y oriente), que aflora en las áreas costeras empantanadas (CONAGUA, 2020).

Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por su alta permeabilidad secundaria y por su marcada heterogeneidad con respecto a esa propiedad, características derivadas de la abundancia e irregular distribución espacial de las oquedades y conductos de disolución formados por el impacto químico del agua sobre las rocas carbonatadas (CONAGUA, 2020).

Como se mencionó, en la isla no existe evidencia de ríos o arroyos, de caudal considerable para desembocar en el mar; esto es debido al elevado contenido kárstico y a la delgada capa de suelo superficial, que facilita la rápida absorción del agua de lluvia hacia el subsuelo. Esto favorece la circulación hidráulica subterránea que ha generado en toda la isla un sistema de cavidades o cavernas, algunas de las cuales afloran hacia la superficie, a través de los cenotes. Ejemplos de este tipo de formación son los sistemas kársticos de cavernas inundadas del cenote El Aerolito, con alrededor de 10,000 m de cavernas y túneles explorados; y La Quebrada, ubicado en el extremo sur del ANP estatal Parque Natural Laguna de Chankanaab y que ha sido explorados por lo menos 3 km en su interior. Estos cenotes hasta ahora son los dos únicos (de los 18 registrados en Cozumel) con una conexión directa al mar (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007) (Figura 23).





Figura 23. Hidrología de la zona donde se encuentra la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. Se aprecia el sistema de cavernas subterráneo y su conexión con el mar Caribe.





El manto acuífero de Cozumel puede ser representado en un perfil como una cinta horizontal bajo la superficie de la isla y sobre el nivel del agua marina, ésta se adelgaza hacia los extremos costeros siendo más ancha (5 m aprox.) en la pared central de la isla, donde se encuentran las principales áreas de filtración de agua de lluvia al manto. Entre el agua dulce y la de mar se encuentra una interfase con concentración variable de sales. Sin embargo, a pesar del eficiente drenaje superficial que existe en la mayor parte de la isla, se encuentran cercanas a la costa, algunas lagunas sobre áreas en donde la saturación de la arcilla en conjunción con la roca aflorante ha logrado disminuir la filtración rápida del agua; por lo que muchas de estas lagunas poseen vidas temporales, desapareciendo en los meses críticos de sequía, pero otras son permanentes por estar muy cercanas a la costa, como las lagunas: Colombia, La Ciega y Montecristo (CONAGUA, 2020).

La isla de Cozumel está rodeada de arrecifes coralinos, las principales formaciones se desarrollan en el suroeste de su plataforma insular y forman parte del segundo sistema de arrecifes coralinos más grandes del mundo, protegido en esta zona a través del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (INE-SEMARNAP, 1998; CONAGUA 2020).

La zona costera se ubica a unos 130 m del polígono de la propuesta de ANP, por lo que existe una marcada incidencia e intercambio de flujos hídricos, nutrientes y biodiversidad con el sistema de cavernas del cenote El Aerolito, es una zona de costa biogénica estable en sus procesos erosivos-acumulativos (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Brankovits *et al.*, 2021).

El régimen de mareas en la región corresponde al tipo mixto semidiurno, de baja amplitud, registrando los siguientes valores: Nivel medio máximo durante mareas vivas 0.24 m, Nivel medio de pleamar 0.21 m, Nivel medio del mar 0.13 m, Nivel medio de bajamar 0.03 m, Nivel medio mínimo durante mareas vivas 0.00 m (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

Hidrología subterránea

El cenote El Aerolito se ubica dentro del acuífero Isla Cozumel, con clave 2305, cuyo volumen de extracción para el acuífero de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua concesionado al 30 de abril de 2002 suma un total de 8.2 Mm³ /año. La recarga total es de 208.7 Mm³ /año. Las descargas naturales comprometidas del acuífero Isla de Cozumel son: 1) las descargas naturales que tienen lugar hacia el mar y 2) la salida por flujo subterráneo. El volumen calculado es del orden de 108.0 Mm³ /año (CONAGUA, 2020).

Debido a las características geológicas de la isla de Cozumel, casi la totalidad del subsuelo forma parte del acuífero y contenido principalmente en las Formaciones Chankanaab y Abrigo como un único cuerpo de agua que viaja fácilmente debido a la porosidad de dichos estratos. De este modo el acuífero está formado por una gran lente de agua dulce que flota por su menor densidad sobre una de agua salada (haloclina), es decir, la mayor parte de la isla debe ser considerada como un acuífero del tipo libre de aguas freáticas, la parte de mayor recarga y grosor del acuífero es la zona central (CONAGUA, 2020).

El agua fluye hacia la costa a través del subsuelo de manera radial hasta llegar al mar. Eso significa que las zonas inundables se nutren tanto del agua directa de la lluvia como de la que fluye desde el acuífero hasta la costa y que termina por mezclarse con la influencia marina. Estos, junto a la zona de



Laguna Colombia, constituyen las únicas zonas de inundación en la isla, aunque existen también pequeños estanques temporales dispersos en la isla.

En cuanto a la estructura hidrogeoquímica del acuífero, la interfase salina se encuentra entre los 15 y 23 m en su parte central, pero el grosor de la columna de agua dulce disminuye hacia la costa hasta alcanzar un valor de 0 m. Esto se debe en parte al bajo relieve del terreno, con lo que se hace imposible el aprovechamiento de agua en esa zona. Por este motivo, los pozos de aprovechamiento se localizan en la parte central, ligeramente hacia el noroeste, donde el espesor de agua dulce es mayor y tiene valores de sólidos totales disueltos aceptables para el consumo (CONAGUA, 2020) (Figura 24).

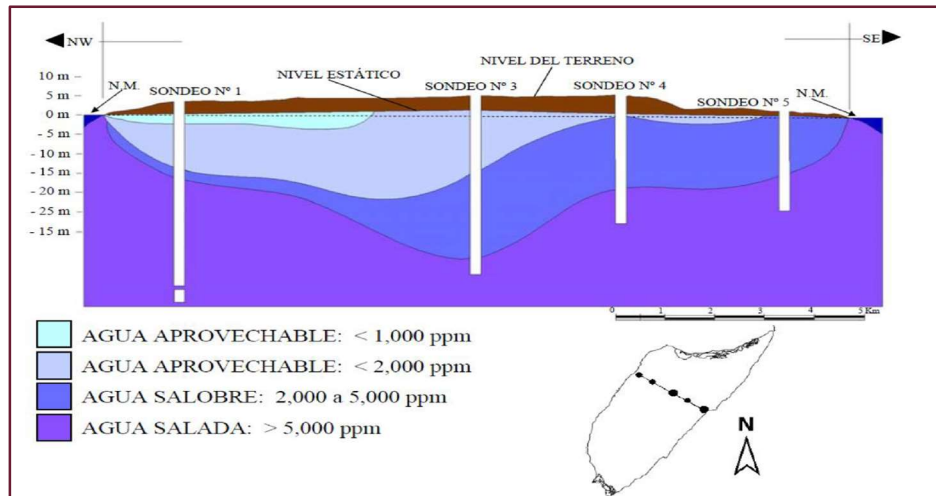


Figura 24. Sección de la isla de Cozumel donde se observa como la capa de agua aprovechable de un máximo de 23 m se localiza de forma desigual, presentando mayor grosor en el lado noroeste. Tomado de SEDESOL (2011).

1.5 FACTORES Y VARIABLES CLIMÁTICAS

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), El Aerolito se ubica en la zona de influencia del clima tipo Am (f): cálido húmedo. En Cozumel la oscilación diaria entre las temperaturas máximas y mínimas es muy pequeña, por lo que la temperatura media, 25.5 °C, es uniforme durante casi todo el año, con excepción de la temporada invernal cuando las temperaturas varían cerca de 20 °C. Los valores extremos registrados son 6 °C y 39 °C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; las lluvias son de verano y el porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual, la precipitación es superior a 40 mm en el mes más seco (Figura 25).

La precipitación presenta máximos valores para el mes de junio y la temporada septiembre-octubre entre 190 y 220 mm y las mínimas en marzo-abril con promedio de 45 mm. En la región se registran dos máximos de precipitación, separados por dos estaciones secas; la de mayor duración en la mitad fría del año, y una de corta duración en la mitad de la temporada lluviosa, la precipitación total anual rebasa los 1,450 mm. El mes de marzo es el más seco con 16.1 mm y septiembre el más húmedo con 233.3 mm. La temporada de lluvias es de junio a octubre; después de ese periodo se pueden presentar copiosas lluvias esporádicas en el invierno y principios de la primavera causadas por los nortes (SEMAR-DIGAHOM, 2023).



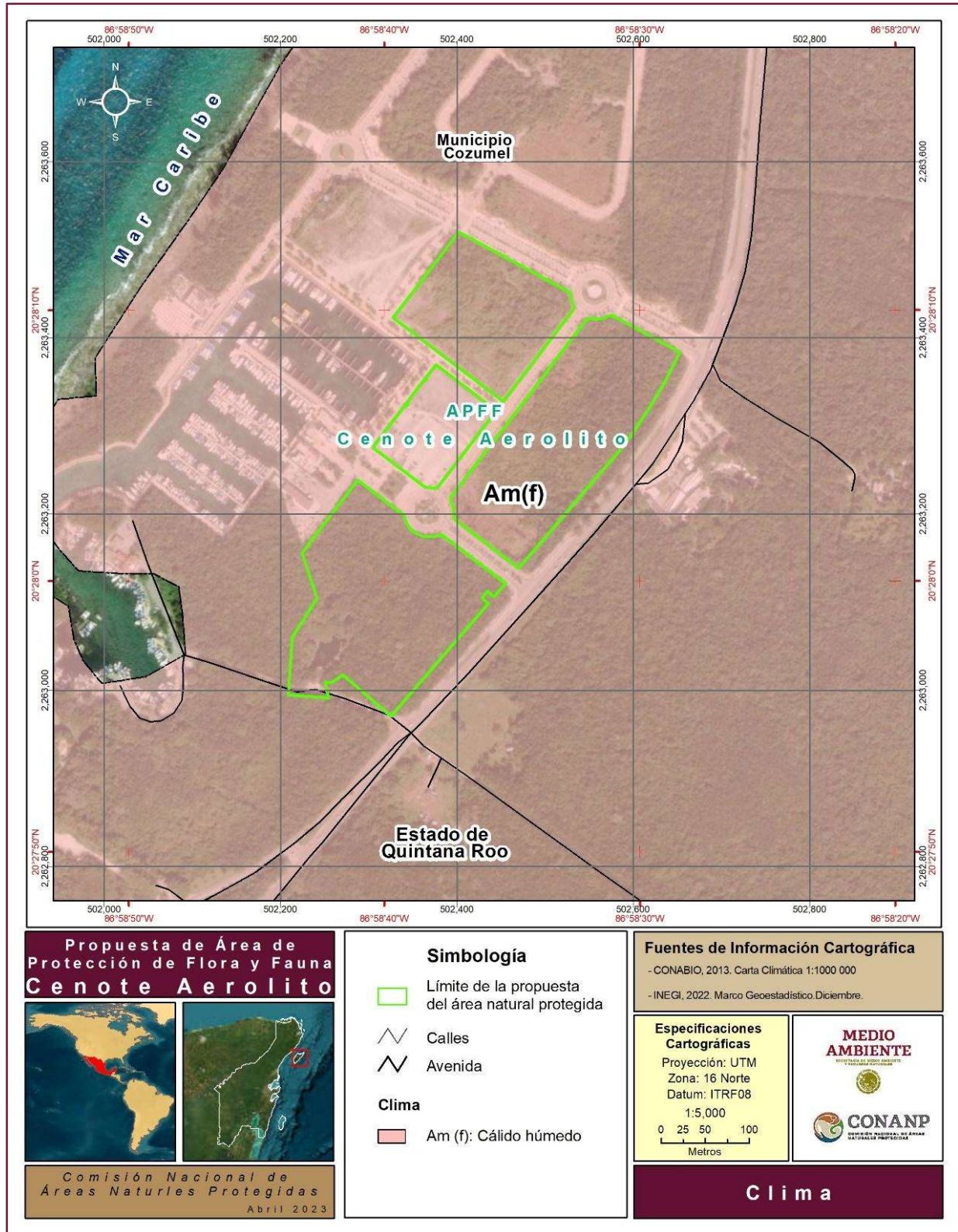


Figura 25. Clima de la zona donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





Humedad relativa. Los registros indican que los valores máximos se presentan de julio a octubre, principalmente en septiembre, coincidiendo con la época de lluvias, mientras que los valores más bajos ocurren en los meses secos (marzo, abril y mayo). En la mayor parte del año el cielo se encuentra de medio nublado a nublado con formaciones columbiformes (con desarrollo vertical) que ocasionan chubascos frecuentes y algunas tormentas eléctricas, principalmente por las tardes y noches. En invierno, el arribo de líneas frontales boreales (nortes) origina nubes estratiformes (en capas o mantos y sin desarrollo vertical) que dan lugar a lluvias ligeras intermitentes (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

La región del Caribe se encuentra en la zona de influencia de los Alisios (vientos que soplan de manera regular de este a oeste desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales), por lo que durante gran parte del año soplan vientos del este, con velocidades entre 15 y 20 nudos. En invierno, el área comprendida dentro del Golfo de México y la parte occidental del Caribe se ve afectada por líneas frontales de baja temperatura que generan vientos del noreste (con intensidades que sobrepasan los 40 nudos y llegan a alcanzar rachas de 60 a 70 nudos), lo que provoca marejadas considerables y alteraciones al patrón de circulación marina. Estos fenómenos tienden a generar erosión de playas. La brisa terrestre se manifiesta por una disminución en la velocidad de los Alisios durante la noche y primeras horas de la mañana. La brisa marina causa una aceleración en la velocidad del viento durante el día. Ocasionalmente se encuentran vientos del oeste después del paso de un frente frío o cuando se aproxima alguna perturbación ciclónica tropical (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

Durante la mayor parte del año los vientos del este y sureste son dominantes en la región, a excepción de la temporada invernal, cuando la dirección de estos cambia al norte-noroeste. Lo anterior ocasiona que la costa de barlovento sea la más expuesta a la energía del oleaje, trayendo como consecuencia el desarrollo de zonas de rompientes en forma de escalones escarpados y pequeños acantilados. La costa de sotavento está resguardada la mayor parte del año y únicamente se ve afectada durante la temporada de nortes (viento del N), siendo el promedio anual de 0.5 a 1.5 m (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

Huracanes. Quintana Roo está ampliamente expuesto a fenómenos hidrometeorológicos extremos, desde tormentas tropicales hasta huracanes de cualquiera de las cinco categorías de la escala Simpson-Saffir. Comparativamente con los otros estados costeros del país, las costas del estado son las más frecuentadas por huracanes, que son los principales fenómenos meteorológicos de la temporada oficial que abarca del 1 de junio al 30 de noviembre (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

Los principales fenómenos meteorológicos que impactan anualmente a la península de Yucatán están relacionados con la época: en el verano e invierno se observan los nortes o frentes fríos; y en abril y mayo se presenta un período relativamente seco. A partir de mayo y hasta octubre, las condiciones meteorológicas en la región se ven fuertemente influenciadas por la presencia de ondas tropicales cuyo potencial de humedad es importante, se presenta entonces la temporada lluvias, que son de tipo tropical (SEMAR-DIGAHOM, 2023).

Los fenómenos meteorológicos tropicales que se presentan de mayo a noviembre se originan generalmente al este del mar Caribe en el Océano Atlántico, viajan hacia el oeste rumbo al Golfo de México, Florida y la costa del este de EUA o se disipan al llegar a las aguas frías del Atlántico norte. La mayor parte de los fenómenos generados en la zona, adquieren grandes magnitudes debido a que se





desplazan amplias distancias sobre las aguas cálidas del Atlántico tropical, que los alimentan de energía, siendo devastadores sus efectos en las zonas a su paso.

2. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

Los humedales son áreas terrestres saturadas o inundadas de manera estacional o permanente en donde el agua es el principal factor que controla el ambiente, así como la vegetación y la fauna asociada. Entre los humedales continentales se incluyen pantanos, ciénegas, marismas, lagos, ríos, arroyos, lagunas, cenotes, entre otros. Estos ecosistemas son de los entornos más productivos y una de las principales fuentes de diversidad biológica, son reservorios de agua y sitios de alimentación y reproducción de innumerables especies vegetales y animales (CONANP, 2022a; SISR, 2022).

La Ley de Aguas Nacionales en su artículo 3, fracción XXX define a los humedales como zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional, las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.

Estos sitios ofrecen importantes beneficios y servicios ambientales como el abastecimiento de agua, la regulación del clima o la protección contra las inundaciones. Son áreas críticas de biodiversidad que albergan numerosas especies, muchas de ellas amenazadas o endémicas (CONANP, 2022a).

La propuesta de APFF Cenote Aerolito está inmersa en uno de los sistemas de cavernas subterráneas más importante de México y del mundo, dado los procesos únicos que ahí se presentan, así como su biota endémica. Sin embargo, la zona de interés colinda con infraestructura y desarrollos turísticos, con los múltiples impactos y amenazas asociados que esto implica, por lo que es una de las zonas con mayores riesgos y amenazas hacia la biodiversidad de Cozumel.

La biodiversidad de la eventual ANP es sobresaliente, ya que en ella se encuentra el 60% de la fauna de cuevas anquihalinas registrada en México, además de diversos endemismos de vertebrados e invertebrados. Actualmente la propuesta de APFF Cenote Aerolito es un ecosistema único en su tipo y características, y es el hábitat de 290 especies vegetales y animales nativas (Anexo 1), de las cuales 24 están incluidas en alguna categoría de riesgo conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010 y 22 tienen algún grado de endemismo (Anexo 2). Este total no incluye a las 10 especies exóticas, exóticas-invasoras registradas hasta el momento en la zona (Tabla 3).

Tabla 3. Número de especies nativas, en riesgo, endémicas, prioritarias y exóticas e invasoras por grupo taxonómico en la propuesta de APFF Manglares de Puerto Morelos.

Grupo	Especies nativas	NOM-059-SEMARNAT-2010	Especies endémicas	Especies prioritarias	Especies exóticas e invasoras
Plantas vasculares	60	1	2	0	3
Invertebrados	70	1	9	0	0
Tunicados	1	0	0	0	0
Peces	23	4	2	0	0
Reptiles	3	3	1	0	2
Aves	123	14	11	6	4
Mamíferos	13	2	2	1	1
Total	293	25	27	7	10





La integración de la lista de especies (Anexos 1 y 2), así como la descripción de los tipos de vegetación y los grupos taxonómicos, es el resultado del trabajo de campo y el análisis y sistematización de información científica y bases de datos como las del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de la CONABIO y del Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Los registros de fauna cavernícola fueron proporcionados por el Dr. Luis M. Mejía-Ortiz, especialista en invertebrados cavernícolas de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo Campus Cozumel. Para la evaluación de la calidad de la información en estas bases de datos se realizó un proceso de validación nomenclatural y biogeográfica con fuentes de información especializada. En el Anexo 1 se integra la lista de especies e infraespecies aceptadas y válidas conforme a los sistemas de clasificación y catálogos de autoridades taxonómicas correspondientes para cada grupo taxonómico. En el Anexo 2 se enlistan las especies e infraespecies con categoría de riesgo conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010 registradas en la propuesta de APFF Cenote Aerolito.

2.1 TIPOS DE VEGETACIÓN

Un rasgo característico de Quintana Roo es su exuberante vegetación neotropical. La diversidad de las comunidades vegetales depende de la topografía, el suelo y el clima. El estado y la isla de Cozumel pertenecen a la región fitogeográfica de la Península de Yucatán, y el tipo de ecosistema principal es la selva tropical húmeda con dominancia de especies arbóreas, temperaturas cálidas y alta humedad (Valdez-Hernández e Islebe, 2011; Ek, 2011).

Las selvas están formadas por vegetación arbórea de origen tropical y reúnen un gran número de especies, muchas de ellas con contrafuertes o aletones, poseen bejucos, lianas y plantas epífitas. Las selvas se clasifican por su altura y por la caducidad de sus hojas en época de secas y, en segundo término, por su composición vegetal, ya que es muy compleja. En Quintana Roo predomina la selva mediana subperennifolia donde se insertan el resto de las comunidades vegetales. En menor proporción existen el tular-sibal, el popal, tasistal y la sabana con pino caribeño. Como resultado de las actividades humanas, se han formado selvas secundarias que, al igual que los pastizales o palmares inducidos, no se consideran tipos de vegetación. Además, los suelos son drenados, excepto en áreas cercanas a la costa, donde es escaso o nulo, lo que favorece la formación de humedales, ecosistemas cuyos suelos se encuentran inundados de agua dulce o salada, de los cuales, los más representativos son los que están ocupados por manglares en extensas áreas costeras (Ek, 2011).

Conocer la ecología y evolución de las especies vegetales isleñas ayuda a comprender mejor la evolución de la vegetación en la región continental de la Península Yucateca. Es por ello que, desde el punto de vista ecológico, evolutivo y fitogeográfico, las islas tienen un gran valor, pues en muchos casos son refugios de aves migratorias o simplemente son utilizadas como puentes para el desplazamiento de las especies a diferentes lugares, fenómeno que también debe considerarse relevante para la dispersión de las especies vegetales. La vegetación insular de la península de Yucatán está constituida por la cubierta vegetal presente en las islas y cayos en el Golfo de México, Canal de Yucatán y mar Caribe. La isla de Cozumel pertenece a Yucatán y mar Caribe y es la de mayor extensión de este complejo, su vegetación es de las más desarrolladas, ya que se pueden encontrar comunidades vegetales como selva mediana subcaducifolia, selva mediana y baja subperennifolia, manglar, vegetación de duna costera y tular (Flores, 1992).





METODOLOGÍA

Para la obtención de la cobertura del uso de suelo y vegetación en la poligonal de la propuesta de ANP se realizaron procesos de fotogrametría, fotointerpretación, análisis geoespacial y trabajo de campo en acompañamiento de especialistas en botánica y asociaciones vegetales. El proceso se realizó conforme a lo siguiente:

INSUMOS

- Polígono de la propuesta de APFF Cenote Aerolito.
- Imagen multiespectral de alta resolución SENTINEL-2 del *Programa Copernicus*, el cual forma parte del Programa de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA), resolución de 10 metros con 13 bandas.
- Imágenes de dron tipo cenital para la generación de mosaico de ortofoto fotos, promedio de altura del vuelo de 50 metros, resolución 2-5 cm/pixel, con un traslape de 50%.
- Imágenes de dron, tipo oblicuas, para perspectiva y contexto del sitio de interés.
- Imágenes de terreno para los tipos de vegetación a nivel de especie.
- Archivo vectorial del conjunto de puntos de paso (track) realizado en las jornadas de identificación y trabajo de campo.
- Vídeos aéreos tomados con el dron, a diferentes alturas en calidad 4k.
- Clasificación de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII del INEGI, escala 1: 250,000, como línea base (INEGI, 2022a).
- Archivos vectoriales de referencia, tales como datos topográficos en diversas escalas dependiendo de la zona de trabajo, red nacional de caminos, cuerpos de agua, escurrimientos perennes e intermitentes, entre otros.
- Imágenes multitemporales del visualizador Google Earth.

ANÁLISIS Y PROCEDIMIENTOS

1. Identificación y trabajo de gabinete

- Con base en la zona de estudio se identifican los tipos de vegetación, como referente se utiliza el conjunto de datos vectoriales de la carta USV serie VII.
- Se elaboran mapas de trabajo de campo incorporando la imagen de satélite Sentinel-2 en falso color (bandas 8, 4, 3) y color natural (bandas 4, 3, 2).
- Se proponen los sitios para el recorrido en transectos en función de las estructuras y comunidades vegetales representativas y de interés.
- Para sitios inaccesibles se emplea el uso de drones, diseñando un plan de vuelo basado en el área de estudio, con los parámetros y configuraciones apropiadas para la identificación de la cobertura vegetal en el orto mosaico.

2. Trabajo de campo

- Se realizaron recorridos de campo los cuales se georreferencian mediante aplicaciones en dispositivos inteligentes (Apps) con el acompañamiento de especialistas en botánica y guías locales que apoyan en la identificación *in situ* de las especies representativas de cada tipo de





vegetación, así como en sus nombres comunes y usos tradicionales. Dependiendo la accesibilidad se abarca la mayor superficie posible.

- Se implementa el uso de drones realizando vuelos oblicuos para fotografía y videos de contexto y doseles para la comprensión de las características generales del territorio y contar con registros para el análisis en gabinete de la composición de la vegetación.
- Se implementa los métodos de fotogrametría con dron, así como fotos en terreno, videos del terreno y sitios de muestreo.

3. Procesamiento de la información de campo y análisis de percepción remota multi espectral y comparativa con los insumos

- Para el uso de las imágenes satelitales se aplicó un re-muestreo en la resolución espacial, homogenizando las diferentes resoluciones de las 13 bandas a 10 m. Con base en lo anterior, se realizaron diversas composiciones de bandas multiespectrales para poder identificar y delimitar a una escala adecuada, en función del vigor, textura, patrones de la cobertura vegetal y realce de diversas coberturas, como los cuerpos de agua, los caminos, las escorrentías y la infraestructura (caminos). Se procesaron imágenes satelitales SENTINEL-2 correspondiendo a escenas de primer trimestre del año actual, cuyas características se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de las imágenes satelitales SENTINEL-2.

Fuente: <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus>

Banda	Resolución espacial (m)	Longitud de onda (nm)	Descripción
B1	60	443 ultra azul	Costa y aerosol
B2	10	490	Azul
B3	10	560	Verde
B4	10	665	Rojo
B5	20	705	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B6	20	740	
B7	20	783	
B8	10	842	
B8a	20	865	
B9	60	940	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B10	60	1375	
B11	20	1610	
B12	20	2190	

- La fotointerpretación del mosaico de imágenes dron coadyuvó en el reconocimiento de patrones de vegetación en la poligonal y zonas adyacentes.
- El recorrido georreferenciado (track) junto con la identificación de las especies representativas y en asociación con la fotointerpretación, permitió identificar las particularidades de la vegetación del sitio, extrapolando los tipos de vegetación con las texturas y patrones.
- En algunos casos se ocuparon los vectores de referencia para complementar el análisis y la definición de conjuntos de estructuras de vegetación y uso de suelo.
- El trazo a partir de la foto interpretación fue apegado a una escala base con relación a la unidad mínima cartografiada definida por el analista y en relación de los diversos análisis





comparativos de los insumos. Esta escala depende de la calidad del material base y la extensión territorial de la zona de estudio.

4. Validación por el grupo técnico especialista

- La capa vectorial resultante de la foto interpretación, es etiquetada conforme a la clasificación del uso del suelo y vegetación del INEGI (INEGI, 2022a) y ajustada conforme a Miranda y Hernández-X (1963).
- Esta cobertura se pone a consideración de investigadores y especialistas del Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (IBUNAM), quienes emiten su aprobación.

RESULTADO

Mediante el uso de un sistema de información geográfica se elaboró la cartografía temática de uso del suelo y vegetación y el cálculo de superficies finales.

Descripción de los tipos de vegetación

En cada transecto se observaron y registraron las características fisonómicas, de estructura y desarrollo de la vegetación; asimismo, se identificaron las especies vegetales presentes y dominantes. Los datos primarios obtenidos en campo se procesaron para determinar y describir los tipos de vegetación conforme a la clasificación establecida por Miranda y Hernández-X (1963) para la vegetación de México. Se describieron algunas condiciones ecológicas, la fisonomía y la composición florística dominante por cada tipo de vegetación.

Conforme a lo anterior, en la poligonal propuesta para el APFF Cenote Aerolito se identificaron los siguientes tipos de vegetación: 1) selva baja subperennifolia, 2) selva mediana subperennifolia, 3) tular y 4) manglar (Tabla 5 y Figura 26).

Tabla 5. Superficie de los tipos de vegetación y uso de suelo en la poligonal de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.

Uso de Suelo y Vegetación	Superficie	
	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
Selva baja subperennifolia	7.17	70.30
Selva mediana subperennifolia	0.99	9.75
Suelo desnudo	0.85	8.37
Tular	0.43	4.23
Manglar	0.20	1.97
Zona inundable	0.20	1.93
Vegetación secundaria de selva baja subperennifolia	0.15	1.52
Caminos	0.10	0.98
Cuerpo de agua	0.10	0.95
Total	10.19	100



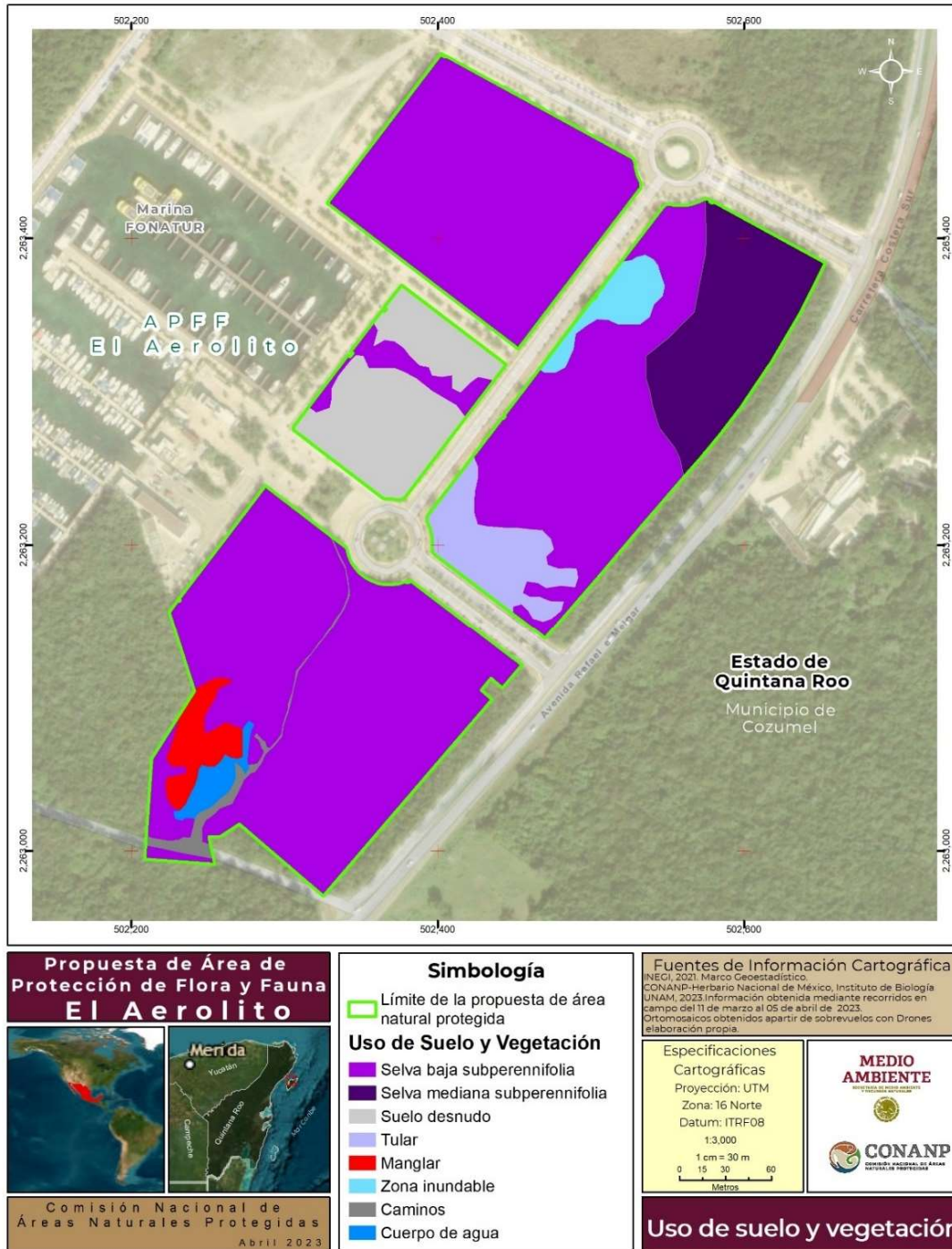


Figura 26. Uso de suelo y vegetación en la poligonal de la propuesta de APFF Cenote Aerialito en Cozumel, Quintana Roo. En rojo se señala el manglar circundante a la entrada del cenote, y que, aunque representa menos del 2%, de la superficie total del ANP, es fundamental para sostener los procesos biogeoquímicos que sostienen a la biota cavernícola del cenote.





Selva baja subperennifolia

Este tipo de vegetación es el de mayor cobertura en el sitio de interés con más del 70% de la superficie equivalente a 7.17 ha. Esta selva se desarrolla en suelos profundos con drenaje deficiente, de tal manera que se pueden inundar en época de lluvias y está relacionada con hondonadas. Generalmente se presentan árboles bajos y la composición florística está determinada por el factor edáfico, con especies tolerantes a inundaciones. En la propuesta de ANP se encuentra una selva en buen estado de conservación, desarrollada sobre sustrato kárstico, con hundimientos y poco desarrollo de su suelo. Los árboles tienen una altura promedio de 12-14 m. Se presentan especies arbóreas como el chechem negro (*Metopium brownei*), el tsalam (maya) (*Lysiloma latisiliquum*), la cola de armadillo (*Coccoloba cozumelensis*), el uvero (*Coccoloba spicata*), el capomo (*Brosimum alicastrum*), la campanilla (*Cascabela gaumeri*), el barbasco (*Piscidia piscipula*), el guano (*Sabal mexicana*), el avellano (*Coulleria platyloba*), el ayale (*Crescentia cujete*), el hueso de tigre (*Esenbeckia berlandieri*), el palo de asta (*Gymnanthes lucida*), el palo de Campeche (*Haematoxylum campechianum*), el zapote amarillo (*Casearia thamnia*), la cancerina (*Semialarium mexicanum*), el palo azul (*Swartzia cubensis*), y el cacho de toro (*Bursera simaruba*), y dentro los estratos arbustivo y herbáceo especies como el aretillo (*Hamelia patens*), la majagua (*Hampea trilobata*) y el helecho de playa (*Acrostichum danaeifolium*). Es importante mencionar que en las grandes áreas de suelo desnudo se pueden llegar a encontrar restos de esta selva, así mismos se destaca la vegetación secundaria derivada de esta asociación vegetal con cerca del 1.5 % de la superficie total, equivalente a 0.15 ha. Esta vegetación muestra un efecto de borde en las orillas de caminos donde crecen especies indicadoras de perturbación como el cachito de toro (*Acacia cornígera*) y el yarumo (*Cecropia peltata*).

Selva mediana subperennifolia

Esta selva es la segunda en cuanto a extensión de cobertura en la propuesta de ANP con poco más del 9% de su superficie, equivalente a 0.99 ha. Se trata de selvas, también en buen estado de conservación, con ejemplares arbóreos de diámetros grandes. Se caracteriza porque del 25 al 50% de los árboles que la forman pierden sus hojas en lo más acentuado de la época seca. Presenta clima cálido y subhúmedo, con temperatura media anual superior a 20°C. En este tipo de vegetación es posible encontrar zonas inundables y corrientes de agua. En los alrededores del cenote El Aerolito esta asociación se caracteriza por desarrollarse sobre suelos cársticos. Los árboles que la conforman tienen una altura promedio de 25-30 m. Entre las especies presentes en el estrato arbóreo se encuentran el bejuco de estribo (*Dalbergia glabra*), el capomo (*Brosimum alicastrum*), el nance agrio (*Byrsonima crassifolia*), el cocoite (*Gliricidia maculata*), el palo de Campeche (*Haematoxylum campechianum*), el guano macho (*Sabal yapa*), la cancerina (*Semialarium mexicanum*) y el palo azul (*Swartzia cubensis*), y en el estrato arbustivo se encuentran el aretillo (*Hamelia patens*), la majagua (*Hampea trilobata*) y el caimitillo (*Sideroxylon americanum*).

Tular

Este tipo de vegetación representa poco más del 4% de la superficie de la propuesta de APFF Cenote Aerolito, equivalente a 0.43 ha. Esta comunidad vegetal está constituida por agrupaciones densas de plantas herbáceas enraizadas en el fondo de lugares francamente pantanosos, en suelos lodosos o





casi permanentemente inundados con una lámina de agua de pocos centímetros hasta 1.5 m de espesor. Se encuentra en climas cálidos o templados, húmedos o secos, y a veces en las orillas de lagos o lagunas cubren grandes extensiones. Dentro de la propuesta de ANP este tipo de vegetación se encuentra en un bajo inundable, donde la especie predominante es *Typha dominguensis*, además se presentan en los alrededores algunos ejemplares de *Haematoxylum campechianum* y *Crescentia cujete*.

Manglar

Este tipo de vegetación es el de menor cobertura de la propuesta de ANP con casi el 2 % equivalente a 0.2 ha, pero la más importante para el funcionamiento del sistema de cavernas subterráneas del cenote El Aerolito. Se desarrolla en superficies permanentes o estacionalmente inundables con especies vegetales adaptadas a estas condiciones.

Está dominado por especies vegetales arbóreas o arbustivas, los mangles. Se cataloga como un tipo de humedal costero, ya que se encuentra en las desembocaduras de ríos, lagunas costeras y esteros, con la particularidad de estar influenciado por agua salada marina y agua dulce proveniente del escurrimiento de las cuencas hidrológicas a través de ríos, arroyos y afluentes de agua subterránea. Estas condiciones de inundación y agua salobre han propiciado en los mangles adaptaciones muy específicas para sobrevivir en estos ambientes. Las zonas donde se distribuye este tipo de vegetación corresponden a suelos fangosos que se ubican en orillas bajas y en pequeñas hondonadas donde existe un drenaje poco eficiente. La distribución del manglar en México está regida principalmente por la temperatura, pues esta comunidad sólo prospera en zonas cálidas.

En Cozumel esta comunidad se distribuye alrededor de casi toda la isla, con excepción de una pequeña porción en el sureste. El manglar que se desarrolla al interior de la propuesta de ANP, bordea la parte noreste de la entrada al cenote. Esta comunidad es densa y presenta una altura promedio de 6 m y está conformada por mangle rojo (*Rhizophora mangle*).

Como se ha mencionado, este ecosistema es sumamente relevante, dado que se encuentra en conexión directa con el cenote El Aerolito, generando procesos de exportación de la materia orgánica que sostienen la alta biodiversidad y abundancia del sistema, iniciando el aprovechamiento de estas fuentes de materia orgánica, con los tapetes bacterianos en el cenote, dispersándose posteriormente de manera gradual. Estos recursos también disminuyen conforme a la profundidad y distancia a la entrada del cenote, restringiendo así el número de especies y la densidad de organismos (Mejía-Ortiz, et al., 2006; Calderón-Gutiérrez, 2013) (Figura 27).





Foto: Luis M. Mejía-Ortiz/Archivo Conanp

Figura 27. Manglar adyacente a la entrada, y principal fuente de energía externa, del cenote El Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.

2.2 BIODIVERSIDAD

Las islas de México son un recurso de incalculable valor para el país ya que su biodiversidad contribuye de manera considerable al capital natural de México y son de los territorios más ricos del mundo en cuanto a biodiversidad (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2010).

Nuestro país cuenta con 3,210 islas y más de 900 elementos insulares como islotes, arrecifes, cayos, rocas y bajos. Estos hábitats son importantes sitios de agregación y refugio de más del 8% de todas las especies de plantas vasculares y vertebrados terrestres de México, además de alrededor de 2,545 especies en sus ecosistemas marinos asociados (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2010; INEGI, 2015; CONABIO, 2020a).

La biodiversidad insular de nuestro país incluye todos los ecosistemas, especies y genes de las especies tanto en las porciones terrestres de las islas como en las aguas que las rodean. A menudo, la riqueza de especies insulares de flora y fauna, tanto terrestre como marina, incluyen endemismos derivados de procesos evolutivos, por efecto del aislamiento de la biota continental (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2010).

2.2.1 FLORA

La vegetación de Cozumel es de las más desarrolladas de las islas de la península de Yucatán. En general existe un gradiente de vegetación bien definido que inicia a partir de la franja costera este con la vegetación de dunas costeras seguida por el tasistal, el manglar, la selva baja caducifolia y que culmina con la selva mediana subcaducifolia en la porción central de la isla, la cual se extiende hasta la costa oeste donde también persisten manchones de manglar. Hay variaciones sobre este patrón general, existiendo diferentes gradientes en la parte norte, sur, occidental y diversas secciones de la costa oriental que tienen diferentes implicaciones para la biota de la isla (Flores, 1992; Romero-Nájera, 2004, CONANP, 2007).

En la isla se han registrado 542 especies de plantas vasculares distribuidas en 105 familias, esta composición florística representa alrededor del 40% de la flora presente en el estado de Quintana Roo.





Esto es muy relevante ya que Cozumel representa el 10% del área total del estado (Téllez *et al.*, 1989, CONANP, 2007).

La vegetación acuática y subacuática de Cozumel comprende una serie de agrupaciones y comunidades de plantas herbáceas y leñosas que habitan las partes inundables o francamente acuáticas de la isla. Por su distribución y cobertura, destacan los tulares, sibales, tasistales, manglares y ceibadales (Lot y Ramírez-García, 2007).

La flora de los cenotes costeros suele estar asociada con formaciones de manglar, juncos, helechos, palmas y algas. En la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado 60 especies de plantas vasculares nativas (11% del total registrado en Cozumel), distribuidas en 38 familias. Adicionalmente se han registrado tres especies exóticas y exóticas invasoras (Anexo 1) (Schmitter-Soto, 2001; CONABIO, 2023b).

Dentro de estas especies destacan el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), considerada una especie Amenazada de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Anexo 2), y dos especies endémicas de México, el aceitunillo (*Vitex mollis*) y el avellano (*Coullteria platyloba*).

En cuanto a la microflora, el grupo mejor conocido son las bacterias, algunas de interés como indicadoras de contaminación, otras de relevancia en la formación misma del cenote por la erosión de sus paredes. Adicionalmente, ciertas bacterias representan la fuente alternativa de abastecimiento de energía para los organismos que viven en los túneles de oscuridad permanente, alejados del cuerpo abierto del cenote, tal como sucede en el cenote El Aerolito (Schmitter-Soto, 2001).

2.2.2 FAUNA

La fauna terrestre de Cozumel es la típica encontrada en todo el estado de Quintana Roo y la península de Yucatán, sin embargo, por su condición de isla están ausentes las especies más grandes que habitan en las zonas continentales, como felinos y grandes herbívoros. En la isla se han registrado alrededor de 140 especies de los grupos faunísticos más conspicuos, incluyendo mamíferos, aves, reptiles y anfibios, siendo la ornitofauna el grupo con el mayor número de especies.

Respecto a los invertebrados terrestres estos han sido poco estudiados, pero se tiene conocimiento de una gran variedad de insectos y crustáceos que forman refugios en oquedades excavadas por ellos mismos en los suelos fangosos del manglar y que durante su época de reproducción migran masivamente hacia la costa.

Por otro lado, los ambientes subterráneos de Cozumel, en particular los sistemas anquihalinos sustentan una alta diversidad de especies únicas a nivel mundial (principalmente invertebrados), gran parte de ellas aún sin clasificar, por lo que en los últimos años se han descrito numerosas especies nuevas para la ciencia (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019).

En este sentido, la fauna que habita en los sistemas cavernícolas puede clasificarse de diferentes maneras. Los organismos trogoxenos (terrestres) y estigoxenos (acuáticos) son aquellos que ingresan a las cuevas de manera accidental, que no es su hábitat cotidiano; buscando refugio o alimento. Son animales ocasionales, debido a que es poco común encontrarlos dentro de las cavernas; por ejemplo,



insectos, arácnidos, serpientes, aves, mamíferos y, en el caso de los ambientes acuáticos, peces, crustáceos, equinodermos y moluscos principalmente (Ruíz-Cancino *et al.*, 2019).

Existen otros organismos que son afines a los sistemas subterráneos pero que no presentan adaptaciones a la vida cavernícola, los denominados troglófilos (terrestres) y estigófilos (acuáticos). Éstos ocupan las cuevas de manera cotidiana como murciélagos y diversos artrópodos. En el caso de los ambientes acuáticos, los crustáceos y peces, ocupan principalmente la cueva para refugio o alimentación (Ruíz-Cancino *et al.*, 2019).

Finalmente, hay organismos que desarrollan completamente su ciclo de vida en los sistemas subterráneos y que presentan adaptaciones morfológicas y estrategias para su sobrevivencia en éstos, como son la pérdida de la pigmentación, la ausencia o desarreglo de las estructuras visuales, incremento en sus estructuras sensoriales (como el alargamiento de sus antenas y anténulas), el desarrollo de estructuras especializadas para el almacenamiento de lípidos y en algunos casos, simbiosis con bacterias sulfuroductoras para sobrevivir en ambientes con bajos contenidos de oxígeno disuelto en el agua (anóxicos), como ocurre en los ambientes anquihalinos. A estos organismos se les llama troglóbios (terrestres) o estigóbios (acuáticos) (Ruíz-Cancino *et al.*, 2019) (Figura 28).

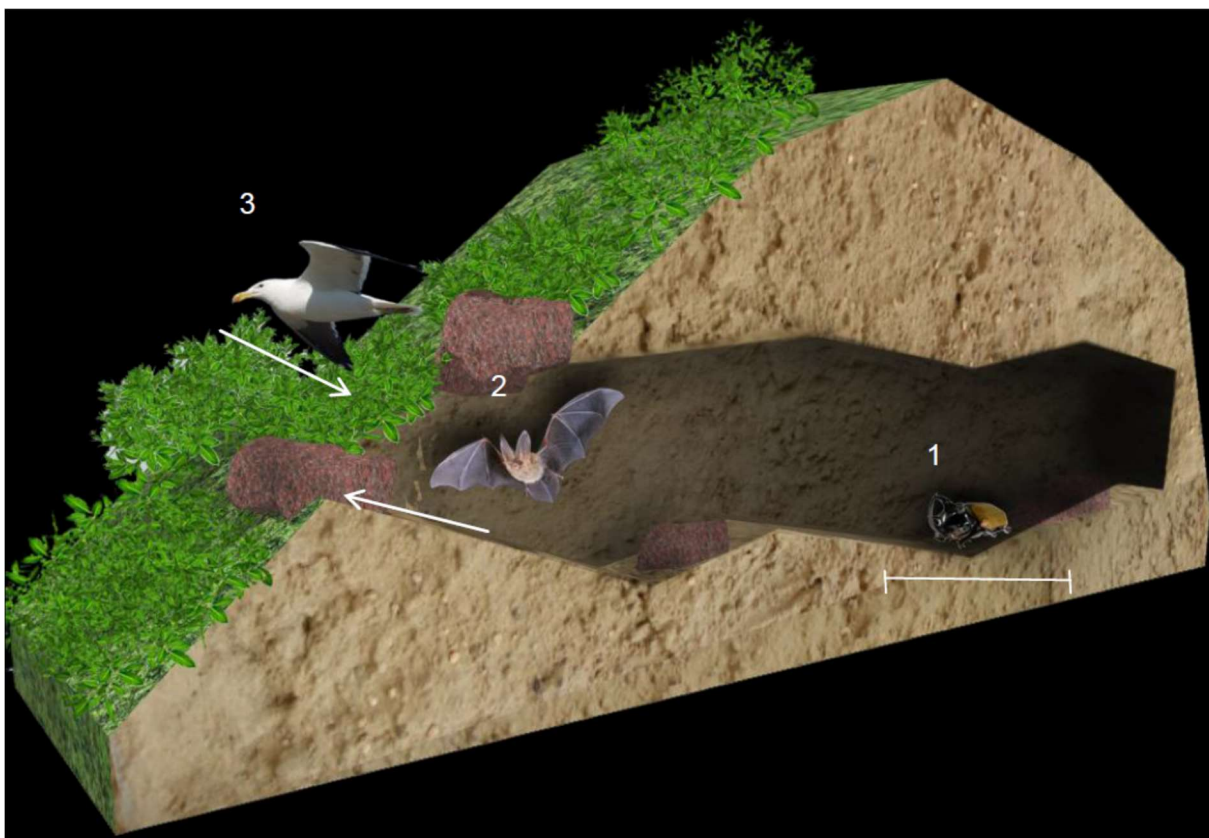


Figura 28. Esquema de la clasificación de la fauna cavernícola o troglóbionte. 1) Troglóbionte, organismo limitado a cuevas, 2) Troglófilo, organismo que puede salir de la cueva y 3) Troglóxeno, organismo que entra ocasionalmente a cuevas. Tomado de Calderón-Gutiérrez (2013).





Las cuevas subacuáticas son reconocidas por su elevado endemismo, presentando las mexicanas una de las mayores riquezas y densidades en el mundo, siendo el sistema de cavernas del APFF Cenote Aerolito un ejemplo notorio ya que en él se han registrado tanto especies consideradas como ocasionales (por ejemplo, peces, crustáceos, algunos anélidos y esponjas), como especies que habitan el sistema permanentemente, entre los que se han registrado equinodermos, crustáceos remipedios, decápodos, anfípodos e isópodos. La existencia de una fauna tan variada en este cenote es de gran importancia para la biodiversidad de Cozumel (Yáñez-Mendoza et al., 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Macroinvertebrados

El sistema de cuevas inundadas del cenote El Aerolito, es reconocido como uno de los más ricos y biodiversos del mundo. Hasta 2002, sólo se tenían reportadas 37 especies (94,6% de crustáceos) en las cuevas anquihalinas mexicanas. Gracias a la exploración y recientes estudios en estos sistemas, actualmente se tienen registrados 171 taxones en todo México, de los cuales 100 (70 identificados a nivel de especie), están presentes en la propuesta de ANP (Anexo 1), dando como resultado que en este cenote este registrado el 60% del total de especies anquihalinas de México (Calderón-Gutiérrez et al., 2017).

Esta riqueza de especies puede ser considerada como una buena representación de la macrofauna del sistema según la curva de acumulación de especies, siendo Echinodermata, Annelida y Porifera los grupos más ricos en contraste con el resto de los ecosistemas subacuáticos del mundo donde el filo dominante es Arthropoda (Calderón-Gutiérrez et al., 2017).

A continuación, se describen brevemente los principales grupos de macroinvertebrados registrados en el sistema de cavernas del cenote El Aerolito, resaltando a las especies que únicamente habitan en el (microendemismos), así como su importancia a nivel mundial.

Esponjas (*Phylum Porifera*) La importancia ecológica de las esponjas radica en gran parte por su capacidad para filtrar grandes cantidades de agua, pudiendo bombear por día hasta 1,200 veces su propio volumen. Esta gran capacidad de filtración cumple una función ecológica muy importante ya que entrelaza las cadenas alimentarias de los organismos en los ecosistemas marinos. Son capaces de retirar hasta el 90% de las bacterias y entre el 23% y el 63% de los virus del agua, contribuyendo considerablemente a la producción primaria y a la regeneración de nutrientes en los ecosistemas donde están presentes (Carballo et al., 2014).

Debido a la alta conexión con el medio que las rodea, las esponjas son uno de los grupos marinos más importantes como bioindicadores de la calidad ambiental, por lo que es necesario promover más estudios e investigaciones para la riqueza y estatus poblacional de las esponjas en la propuesta de ANP (Carballo et al., 2014).

En la propuesta de ANP actualmente se han identificado a nivel de especie seis esponjas, todas en la zona de aguas marinas del cenote El Aerolito (Anexo 1) (Figura 29). Sin embargo, este número puede incrementarse a más de 20, ya que varias unidades taxonómicas solo han sido identificadas a nivel de familia y/o género, por lo que la descripción de nuevas especies continúa incluyendo a las primeras esponjas mexicanas estigobias. Este es el caso de la desmoesponja (*Amphibleptula aaktun*), recientemente descrita y cuya localidad tipo es el cenote El Aerolito, hasta ahora el único sitio en el



mundo donde ha sido registrada a 21 m de profundidad (Calderón-Gutiérrez, 2013; *et al.*, 2017; *et al.*, 2018; Gómez *et al.*, 2021; CONABIO, 2023a).



Figura 29. Dos de las especies de poríferos registrados en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, las desmoesponjas *Geodia neptuni* (a) y *Acarnus innominatus* (b).
Foto: Fernando Calderón Gutiérrez

Corales y anemonas (Phylum Cnidaria)

Los cnidarios son un phylum exclusivamente acuático al que pertenecen medusas, pólipos, corales y anémonas. Particularmente la clase Anthozoa o antozoarios comprende un grupo de cnidarios sésiles marinos, que incluye a corales duros (hexacorales) y blandos (octocorales). En cuanto a las anemonas, estas representan uno de los grupos más conspicuos en las zonas intermareales rocosas donde el cambio en los ciclos de mareas propicia la formación de pozas ideales para su desarrollo. Estos organismos tienen un papel muy importante dentro del ecosistema como productores primarios, filtradores y/o depredadores (CONABIO, 2022a).

En la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han determinado a nivel de especie tres cnidarios, el coral falso (*Corynactis caribbeorum*), en zonas de agua dulce salobre, la anémona (*Isarachnanthus nocturnus*) y el coral verdadero (*Balanophyllia bayeri*), en aguas marinas, siendo uno de los grupos con menor riqueza (Figura 30). Sin embargo, el número de especies crecerá una vez que se identifiquen a nivel de especie, algunos taxones determinados solo a nivel de familia y/o género como la anémona *Bartholomea* sp. (Calderón-Gutiérrez, 2013; *et al.*, 2017; CONABIO, 2023a) (Figura 31).

El éxito de la conservación de este grupo depende en gran parte de la información científica que se genere en cuanto a sus estados poblacionales, por lo que es de vital importancia incrementar los estudios en el cenote El Aerolito, cuantificar su diversidad e implementar las estrategias adecuadas para su conservación.



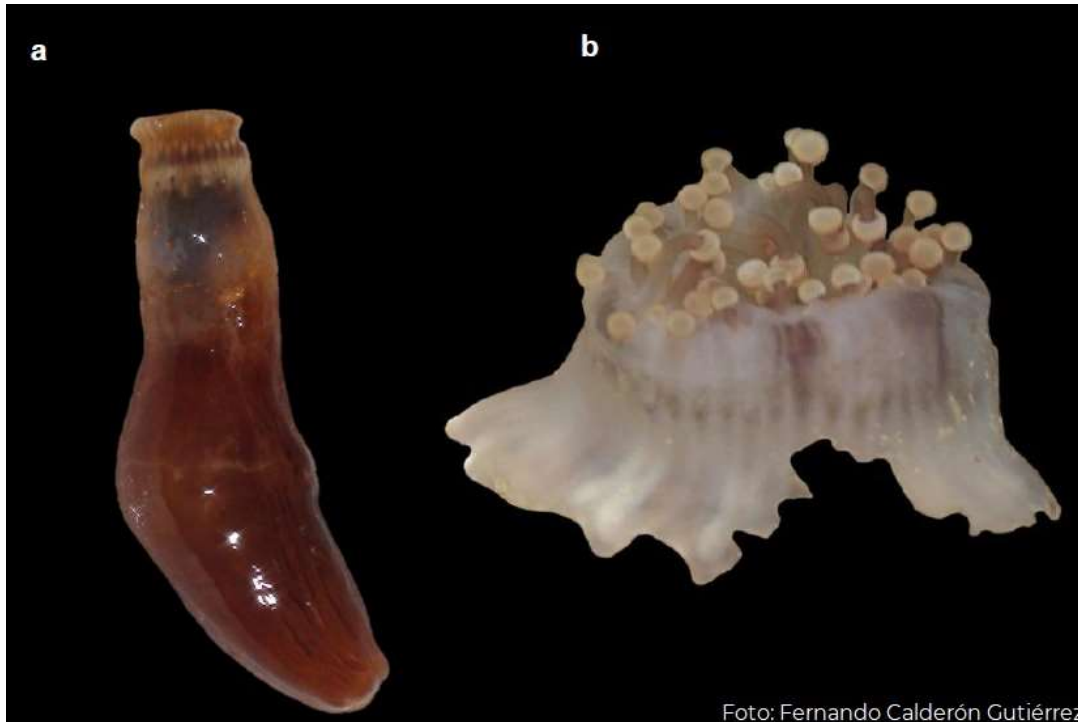


Foto: Fernando Calderón Gutiérrez

Figura 30. Cnidarios registrados en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, (a) la anémona (*Isarachnanthus nocturnus*) y (b) el coral falso (*Corynactis caribbeorum*).



Foto: Robert Stansfield/Archivo Conanp

Figura 31. Algunos cnidarios que habitan el cenote El Aerolito solo han sido identificados a nivel de familia o género, como esta anémona (*Bartholomea* sp.).



Moluscos (Phylum Mollusca)

Este phylum agrupa organismos muy conocidos como ostiones, mejillones, almejas, abulones, lapas, caracoles, babosas, quitones, calamares, sepias y pulpos. Es el grupo de invertebrados con mayor diversidad de especies después de los artrópodos, aunque en los océanos son los más diversos. Como organismos sésiles o de lento movimiento, encuentran en las costas rocosas y sitios intermareales, una gran cantidad de hábitats ideales para su desarrollo, ya que brindan refugio y resguardo ante factores ecológicos (competencia, depredación) y fisicoquímicos cambiantes (temperatura y desecación) (Castillo-Rodríguez, 2014).

Dentro de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado hasta ahora seis especies de moluscos, incluyendo tres bivalvos y tres gasterópodos, todos en la parte marina. Sobresale por encontrarse dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, como especie Sujeta a protección especial, la almeja plana (*Isognomon alatus*) (Anexos 1 y 2). Esta especie ha sido registrada solo en un pasaje de la cueva asociado a una capa de agua sulfurosagua (Calderón-Gutiérrez, 2013; *et al.*, 2017; *et al.*, 2018; DOF, 2019; CONABIO, 2023a).

Otros moluscos presentes en el sistema son la almeja de arca (*Fugleria tenera*), registrada dentro de las paredes de la cueva, cerca de la zona sulfurosa, y la almeja lima (*Ctenoides scaber*), bivalvo de gran belleza (Calderón-Gutiérrez, 2013) (Figura 32).



Foto: Robert Stansfield/Archivo Conanp

Figura 32. Ejemplar de almeja lima (*Ctenoides scaber*), molusco bivalvo habitante de la zona con agua marina de la propuesta de APFF Cenote Aerolito.





Anélidos (*Phylum Annelida*)

Los anélidos o gusanos anillados representan un grupo de invertebrados de gran relevancia y alta diversidad en ambientes marinos desde zonas intermareales hasta profundidades abisales, donde a menudo son el grupo más diverso. Sin embargo, también se encuentran en algunos hábitats de agua dulce y en sistemas cársticos como cenotes y sus cuevas asociadas. Su papel es fundamental en los ecosistemas donde habitan, principalmente en los procesos de bioerosión, en su función como bioindicadores y por ser componentes de las redes tróficas de especies comerciales (Frontana-Urbe y Solis-Weiss, 2011; Tovar-Hernández *et al.*, 2014).

Dentro de este filo, junto con los oligoquetos y los hirudíneos, se encuentran los poliquetos, que son la clase más diversa con unas 15,000 especies descritas actualmente. A pesar de los pocos estudios en México, se sabe que el grupo de los anélidos poliquetos es abundante y diverso con alrededor de 1,500 especies (Tovar-Hernández *et al.*, 2014).

Los registros de poliquetos en cuevas son escasos. En México, este grupo fue registrado por primera vez en cuevas anquihalinas y cenotes, justamente en el cenote El Aerolito, donde son relativamente diversos con 11 especies registradas actualmente, encontrándose tanto en las zonas de agua marina como de agua dulce salobre (Anexo 1) (Frontana-Urbe y Solis-Weiss, 2011; Calderón-Gutiérrez, 2013; *et al.*, 2017; CONABIO, 2023a).

Estos gusanos anillados son uno de los grupos más abundantes en el sistema de cavernas de la propuesta de ANP. La presencia de estas especies puede atribuirse a la abundancia de materia orgánica (raíces de manglar y tapetes de bacterias y algas), en las que los poliquetos prosperan. Esta disponibilidad de alimento, en conjunto con la conexión submarina con el mar, crea las condiciones propicias para que la clase Polychaeta tenga rica representación de especies. Esto incluye taxones que solo se han identificado a nivel de familia, pero que probablemente incluyan hasta cuatro géneros, como en el caso de algunos sabélidos o gusanos plumero (Sabellidae), un grupo de gusanos anillados tubícolas con una corona radiolar que los constituye como una de las familias más vistosas (Frontana-Urbe y Solis-Weiss, 2011; Mejía-Ortiz *com. pers.*) (Figura 33 y Figura 34).

Los poliquetos han sido extensamente utilizados como descriptores de las condiciones y disturbios ambientales debido a su sensibilidad y tolerancia, ya que tienden a ser los primeros colonizadores en un disturbio químico o físico; y responden al enriquecimiento orgánico por descargas de agua contaminada. Dadas las condiciones ambientales y flujos hídricos en el ecosistema, así como las afectaciones por descargas de aguas contaminadas, el monitoreo de los poliquetos en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, cobra una mayor importancia debido a capacidad de actuar como indicadores ambientales.





Foto: Robert Stansfield/Archivo Conanp

Figura 33. Gusano tubícola de la familia Sabellidae, también conocidos como gusanos plumero se caracterizan por sus por branquias plumosas que sobresalen para atrapar alimento.



Foto: Robert Stansfield/Archivo Conanp

Figura 34. En la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado varios taxones de gusanos plumero (Sabellidae) que no han sido identificados a nivel de especie lo que aumentaría la riqueza de este grupo.





Estrellas de mar, erizos y pepinos de mar (Phylum Echinodermata)

Los equinodermos son animales exclusivamente marinos e incluyen organismos como estrellas de mar, erizos, ofiuros, galletas y pepinos de mar. La mayoría forman parte de las comunidades del bentos, aunque habitan diversos hábitats desde pozas de marea hasta profundidades abisales mayores a 11,000 m. Se desarrollan en cualquier tipo de ambiente marino, incluso ambientes extremos como ventilas hidrotermales, infiltraciones de metano y cuevas anquihalinas. También pueden encontrarse a cualquier temperatura, desde zonas tropicales hasta los polos y son de los componentes principales de las comunidades del piso oceánico. Tienen amplias funciones ecológicas como organismos detritívoros, herbívoros, depredadores oportunistas o comensalistas, (Solís-Marín, 2014). Los equinodermos raramente están presentes en sistemas anquihalinos (solo se han registrado en cuatro cuevas del mundo) en bajas densidades. Hasta 2005 los únicos equinodermos reportados que habitaban estas cuevas eran pepinos de mar (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012).

Contrario a la tendencia mundial, en el cenote El Aerolito el grupo de invertebrados más diverso es el de los equinodermos. Con 31 taxones identificados a nivel de especie en el presente estudio, es por mucho la cueva anquihalina con más riqueza de equinodermos en todo el mundo. Además, para resaltar aún más la importancia de este grupo, el sistema alberga dos especies microendémicas cuyo único hábitat es el APFF Cenote Aerolito, la estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*) (Figura 35) y el ofiuro (*Ophionereis commutabilis*), esta última el primer ofiuro cavernícola endémico registrado en México, y la tercera en el mundo (las otras son de EUA y Japón). (Figura 36). Además, las especies dominantes en el sistema son también ofiuros (*O. commutabilis* y *O. reticulata*) (Figura 37) (Solís-Marín y Laguarda-Figueras, 2007; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2013; Hernández-Díaz *et al.*, 2013; *et al.*, 2017; *et al.*, 2018; CONABIO, 2023a).

Al respecto, los asteroideos (Asteroidea) o estrellas de mar han sido reportados debajo de la haloclina en aguas marinas (34 ppm-37 ppm), a 250 m de la entrada del cenote y a 45 m de la entrada marina. Los ofiuros (Ophiuroidea) han sido ubicados debajo de la haloclina en aguas marinas a 40 y 330 m de la entrada, y los erizos (Echinoidea) en aguas marinas a 60 m de la entrada alimentándose de la materia orgánica del suelo (Solís-Marín y Laguarda-Figueras, 2007; Mejía-Ortíz *et al.*, 2007b).

La presencia uno o unos pocos individuos de ciertas especies sugiere que algunas proceden del exterior de la cueva, a través de la conexión con el mar escapando de depredadores o por cambios ambientales. El registro de muchos organismos de otras especies implica que se están reproduciendo dentro del sistema, lo que indica procesos de adaptación a la cueva y aislamiento reproductivo. Por ejemplo, se han reportado densidades hasta 10 individuos por m² de la estrella de mar (*Asterinides folium*), cuando estas densidades no se encuentran fuera de la cueva, donde es escasa su presencia (Solís-Marín y Laguarda-Figueras, 2007; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012).

Estudios recientes han registrado procesos de especiación y adaptación a la vida cavernícola (troglomorfismo). Por ejemplo, se han documentado adaptaciones morfológicas para ambientes cavernarios en el ofiuro endémico (*Ophionereis commutabilis*), como mayores tallas, elongación de brazos y pies ambulacrales y la presencia de rasgos potencialmente pedomórficos, además de un aislamiento reproductivo. Algunos asteroideos muestran procesos de despigmentación, característico de fauna cavernícola, como la estrella de mar (*Asterinides folium*) (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2018; Márquez-Borrás *et al.*, 2020) (Figura 38).





Foto: Robert Stanfield/Archivo Conanp

Figura 35. Estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*), especie microendémica del sistema anquihalino del cenote El Aerolito y única estrella de mar en el mundo que habita en ecosistemas cavernícolas.



Foto: Robert Stanfield/Archivo Conanp

Figura 36. Ofiuro cavernícola (*Ophionereis commutabilis*). Especie exclusiva del cenote El Aerolito con adaptaciones fisiológicas a la vida cavernícola como mayor tamaño y extremidades más largas en comparación con especímenes marinos y una pigmentación peculiar debido a la ausencia de luz.





Foto: Laurent Miroult

Figura 37. Los ofiuros (*Ophionereis commutabilis* y *O. reticulata*) son los equinodermos más conspicuos y con mayores abundancias en el sistema anquihalino de la propuesta de APFF Cenote Aerolito.



Foto: Robert Stansfield/Archivo Conanp

Figura 38. Estrella de mar (*Asterinides folium*), que presenta rasgos troglomórficos (características propias de animales que se desarrollan en zonas oscuras) como la ausencia de pigmentación debido a la falta de luz.





Artrópodos (*Phylum Arthropoda*)

Los artrópodos constituyen un grupo taxonómico muy exitoso evolutivamente con un gran número de especies adaptadas a casi todos los hábitats y microhábitats, por lo que están notablemente diversificados en miles de familias. Constituyen el 85% del total de la fauna mundial y representan el 65% de las especies. Se considera que cerca de 70% de la diversidad específica mundial está representada por este grupo constituido por insectos (Hexapoda), arácnidos (Chelicerata), crustáceos (Crustacea) y miriápodos (Myriapoda) (Llorente-Bousquets y Ocegueda, 2008).

Uno de los subfilos de mayor importancia dentro de los artrópodos son los crustáceos. En particular, los crustáceos decápodos (Decapoda) de la clase Malacostraca incluyen organismos muy conocidos como cangrejos, camarones, langostas, langostinos y cangrejos ermitaños. Poseen cinco pares de apéndices ambulatorios y habitan ambientes desde el marino terrestre y dulceacuícola hasta ecosistemas subterráneos. Ocupan varios nichos ecológicos a lo largo de su vida y tienen en general un alto valor comercial. México posee una alta diversidad costera-marina con características totalmente diferentes (Océano Pacífico, Mar de Cortés, Golfo de Tehuantepec, Golfo de México y Mar Caribe), las especies costeras son muy diversas y están ampliamente representados en lagunas costeras, mangles, ríos, cuerpos de agua dulce y ambientes subterráneos (Mejía-Ortiz *et al.*, 2007c).

Los crustáceos son uno de los principales grupos de la fauna acuática cavernícola de la península de Yucatán, derivados de ancestros marinos y dulceacuícolas. Sin embargo, en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, la riqueza y densidad de crustáceos, y artrópodos en general, es inusualmente baja a diferencia de otros sistemas cavernícolas inundados en el mundo, donde son el grupo más abundante. Solo en el cenote El Aerolito, los artrópodos no son el taxón con más riqueza de especies, sin embargo, existen varias especies con algún grado de endemismo (Barba-Macías y Palacios-Vargas, 1998; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2013; *et al.*, 2017).

Hasta el momento en la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han identificado a nivel de especie 13 crustáceos de las clases Malacostraca y Ostracoda (Anexo 1), incluyendo especies endémicas de la región como el camarón (*Procaris mexicana*) (Figura 39), un anfípodo (*Bahadzia bozanici*) y una cochinilla (*Metaciroilana mayana*); especies endémicas de los sistemas subterráneos anquihalinos de Cozumel como el camarón chasqueador (*Yagerocaris cozumel*) (Figura 40); y sobre todo especies que solo han sido registradas en el cenote El Aerolito, como el anfípodo (*Cymadusa herrerae*), registrado alimentándose de macroalgas en el fondo del cenote, o la cochinilla (*Cirolana adriani*). También se han registrado especies terrestres como el cangrejo azul (*Cardisoma guanhumi*), presente en gran parte de la isla y que realiza importantes migraciones locales a la costa en época de reproducción (Barba-Macías y Palacios-Vargas, 1998; Mejía-Ortiz *et al.*, 2007c; Trujillo *et al.*, 2010; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2013; *et al.*, 2017; *et al.* 2018; Gutiérrez-Aguirre *et al.* 2018; CONABIO, 2023a).

Ecológica y biológicamente, los crustáceos son fundamentales en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos; por su abundancia y diversidad dan estructura a las comunidades de macroinvertebrados que habitan en ellos; y por la posición que ocupan en las cadenas tróficas como consumidores secundarios, se encargan de la transformación de la materia orgánica suspendida en la columna de agua o depositada en el fondo, en energía y proteínas consumibles por los eslabones



finales. Otros crustáceos por sus hábitos cavadores recuperan los nutrientes de capas inferiores del fondo marino y los reciclan hacia la columna del agua (García-Madrigal *et al.*, 2012).



Foto: Robert Stansfeld/Archivo Conanp

Figura 39. Camarón endémico de la región (*Procaris mexicana*), habitante de las aguas anquihalinas del cenote El Aerolito.



Foto: Robert Stansfeld/Archivo Conanp

Figura 40. Camarón chasqueador chasqueador (*Yagerocaris cozumel*), especie que solo ha sido registrada en la propuesta de APFF Cenote Aerolito.

Finalmente, es importante considerar que el número de invertebrados reportados en el presente estudio es solo una aproximación, ya que conforme avancen los diversos estudios científicos que se encuentran en marcha, se incrementará el número de especies en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, considerando taxones que solo se han identificado a nivel de familia y/o género, principalmente poríferos, anélidos poliquetos, nemertinos, platelmintos y artrópodos, como por ejemplo picnogónidos (Chelicerata)(Figura 41).

La declaratoria de la eventual ANP generará un campo propicio para continuar incrementando el conocimiento científico de este grupo para su efectivo manejo y conservación, considerando su carácter único en el mundo.





Figura 41. La riqueza de invertebrados en la propuesta de APFF Cenote Aerolito se incrementará conforme muchos taxones sean identificados a nivel de especie como este picnogónido (*Chelicerata*).

Vertebrados

Las islas de México son de los territorios más ricos del mundo en cuanto a biodiversidad. Albergan, por lo menos, al 8.3% de todas las plantas vasculares y vertebrados terrestres del país. Son importantes sitios de agregación y refugio de diversas especies de mamíferos, aves y reptiles. La biodiversidad insular de nuestro país incluye todos los ecosistemas, especies y genes de las especies tanto en las porciones terrestres de las islas como en las aguas que las rodean. A menudo, la riqueza de especies insulares de flora y fauna, tanto terrestre como marina, incluyen endemismos derivados de procesos evolutivos, por efecto del aislamiento de la biota continental (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2010).

A pesar de la relativamente pequeña superficie de la propuesta de APFF Cenote Aerolito (10.199113 ha), sus asociaciones vegetales y humedales albergan 162 especies de vertebrados nativos (23 peces, tres reptiles, 123 aves y 13 mamíferos) incluyendo 16 especies con algún grado de endemismo.

Peces (Clase Osteichthyes)

La fauna acuática es considerada un excelente indicador de la salud y condiciones ambientales de los ecosistemas acuáticos, debido a sus condiciones de aislamiento, particularmente las especies cavernícolas que han desarrollado adaptaciones específicas estrechamente relacionadas con las condiciones en las que viven. En Quintana Roo se han registrado alrededor de 130 especies de peces continentales incluyendo especies dulceacuícolas que habitan en cenotes, lagunas y charcas, y peces marinos que pueden encontrarse en medios dulceacuícolas de manera habitual, lo cual representa alrededor del 24% del total nacional. Muchos de los hábitats acuícolas continentales son de difícil





acceso, lo que explica el aún escaso conocimiento ictiofaunístico continental de la región (Schmitter-Soto, 1996; Pozo *et al.*, 2011).

A nivel ecológico, algunas especies son muy estrictas en su preferencia de hábitat. Los peces ciegos viven sólo en los túneles inundados, siempre asociados a oscuridad permanente, lejos de la parte abierta del cenote. Las especies de la parte iluminada de los cenotes son un subconjunto de aquellas que se presentan en las lagunas. A su vez, la ictiofauna de los cenotes de tierra adentro es un subconjunto de la de los cenotes más cercanos a la costa. En general, es común que en los peces se presenten capacidades diferenciales por habitar ambientes con distintos rangos de salinidad, según su capacidad para regular la concentración osmótica de sus células (Schmitter-Soto, 2011; 2020).

La gran mayoría de la ictiofauna característica de Cozumel se encuentra en sus arrecifes con alrededor de 400 especies marinas. La riqueza de especies de aguas interiores y dulceacuícolas es relativamente baja y se trata de un subconjunto anidado de la del continente, es decir, todas sus especies se encuentran también en la península de Yucatán. Las lagunas costeras cozumeleñas son similares en composición a las del norte-noreste de Quintana Roo y sus cenotes se parecen faunísticamente más a los cenotes de tierra firme que a las lagunas costeras en la misma isla (Schmitter-Soto, 2007; Gutiérrez-Aguirre *et al.* 2018).

Específicamente en la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado 23 especies nativas de peces, tanto habitantes del sistema como visitantes ocasionales (Anexo 1). Destacan la presencia de cuatro especies incluidas en la NOM-SEMARNAT-059-2010, los peces loro banda roja (*Sparisoma aurofrenatum*) y semáforo (*S. viride*), ambas Sujetas a protección especial, el topote aleta grande (*Poecilia velífera*), especie Amenazada, y la dama blanca ciega (*Typhliasina pearsei*), especie En peligro de extinción; estas dos últimas especies también endémicas del país (Anexo 2) (Mejía-Ortíz *et al.*, 2006; Schmitter-Soto, 2007; Calderón-Gutiérrez, *et al.*, 2012; 2013; *et al.*, 2017; *et al.* 2018; Gutiérrez-Aguirre *et al.* 2018; DOF, 2019; CONABIO, 2023a).

A pesar de sus bajas densidades, los peces que habitan cenotes y sus sistemas cavernícolas asociados son comunidades de alta importancia ecológica, por la posición clave que ocupan en la trama trófica de los mismos. Además, no debe descartarse que el aislamiento de las poblaciones de Cozumel pueda incluir procesos tempranos de especiación (Schmitter-Soto, 2007) (Figura 42).

Dado los nichos tan específicos que ocupan las especies endémicas y sus bajas densidades, varias de sus poblaciones se encuentran amenazadas. Por ejemplo, a nivel regional las poblaciones del topote aleta grande (*P. velífera*) han tenido un declive asociado a la pérdida de su hábitat y a la contaminación de los cuerpos de agua, ya que el cortejo de la especie se realiza mediante comunicación visual, por lo que las aguas enturbiadas por contaminantes o sedimentos constituyen un impacto adicional (Schmitter-Soto, 2020).

En este sentido la declaratoria del APFF Cenote Aerolito fortalecerá los esfuerzos por conservar la ictiofauna cavernícola de Cozumel, en especial las especies endémicas o con algún grado de amenaza.





Foto: German Yáñez-Mendoza

*Figura 42. En el cenote El Aerolito pueden apreciarse potenciales procesos de especiación y adaptación de la biota a ecosistemas cavernícolas. Este ejemplar, aparentemente una dama blanca ciega (*Typhliasina pearsei*), pueden apreciarse ojos, pero también una falta de pigmentación típica de la fauna cavernícola.*

Reptiles (Clase Reptilia)

La fauna de reptiles de México es una de las más diversas del planeta con 864 especies (8.7% a nivel mundial y 45% de las familias) que incluyen lagartijas, serpientes, anfisbénidos, cocodrilos y tortugas, tanto terrestres como marinas. Además, más de la mitad de estas especies (493) son endémicas (57%), incluyendo varias subespecies (Flores-Villela y García-Vázquez, 2014; CONABIO, 2022b).

Este alto número de endemismos está relacionado en parte con la gran cantidad de islas, mismas que son consideradas como uno de los lugares más ricos e importantes del mundo en cuanto a biodiversidad y en número de especies endémicas, debido a su aislamiento geográfico y a sus dinámicas evolutivas tan particulares. La diversidad de reptiles insulares en México está compuesta por 204 especies con 101 subespecies (Pliego- Sánchez *et al.*, 2021; CONABIO, 2020a).

En la isla de Cozumel se han registrado 23 especies de reptiles terrestres incluyendo algunos endemismos. En la poligonal de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se tiene registro de tres especies nativas (Anexo 1), el toloque rayado (*Basiliscus vittatus*), y el cocodrilo de río (*Crocodylus acutus*) (Figura 43), esta última especie Sujeta a protección especial de acuerdo con la NOM-SEMARNAT-059-2010, y el huico de Cozumel (*Aspidoscelis cozumela*), especie endémica de Cozumel y considerada como Amenazada en la citada Norma (Anexo 2) (González-Baca, 2006; CONANP-SEMARNAT, 2016; CONABIO, 2023a).





El registro de *A. cozumela* es de gran relevancia para la propuesta de APFF Cenote Aerolito, ya que además de que es una de las dos especies de reptiles endémicas de Cozumel, diversos estudios han demostrado que tiene elevada dependencia por las playas arenosas, donde se ha registrado el mayor número de individuos y poblaciones. Particularmente esta especie tiene la característica que todos los individuos son hembras que se reproduce por partenogénesis, fenómeno poco estudiado en vertebrados. Su principal amenaza es la pérdida de hábitat principalmente por el desarrollo de infraestructura turística (CONANP, 2007; Manríquez-Moran y Méndez-de la Cruz, 2008; Hernández-Gallegos, 2015).

También es de resaltar la presencia de la boa (*Boa imperator*), especie considerada como Amenazada en la NOM-SEMARNAT-059-2010, y que sin embargo es una especie exótica invasora en Cozumel, introducida en la década de los 70. Esta especie representa una amenaza para la biota de la isla ya que está ampliamente distribuida y es abundante, además de ser un depredador generalista, para el cual muchas de las especies endémicas de la isla no tienen estrategias de defensa (Martínez-Morales y Cuarón, 1999; González-Baca, 2006; CONANP-SEMARNAT, 2016).



Figura 43. Cocodrilo de río (*Crocodylus acutus*), especie Sujeta a protección especial conforme a la NOM-SEMARNAT-059-2010 con presencia habitual en El Aerolito.

Aves (Clase Aves)

Las aves constituyen uno de los grupos de vertebrados más exitosos, diversos y mejor conocidos del mundo. Gracias a su gran capacidad de adaptación ocupan prácticamente todos los ecosistemas del planeta. De alrededor de 10,500 especies registradas en el mundo, entre 1,123 y 1,150, cerca del 11% del total mundial, habita en México. Esto ubica a nuestro país en el onceavo lugar mundial en riqueza avifaunística y en el cuarto lugar en proporción de endemismo entre los países megadiversos del





mundo. El 77% de las especies se reproducen en México y la mayor parte son especies residentes permanentes, seguidas en número por las visitantes de invierno y las migratorias de paso. Entre 194 y 212 especies son endémicas de México, lo que representa entre el 18 y 20% del total nacional, y entre 298 y 388 especies (26-33%) se encuentra en algún grado de amenaza (Navarro-Sigüenza *et al.*, 2014; Berlanga *et al.*, 2019; CONABIO, 2022e).

Las comunidades insulares de avifauna son un ejemplo clásico de la diversificación en aislamiento, adaptación extrema y cuellos de botella ecológicos, e históricamente han representado a una gran proporción de la diversidad de aves del mundo. Al igual que otros grupos de vertebrados insulares, son vulnerables a la introducción antropogénica de depredadores no nativos y a la pérdida de hábitat, lo que se manifiesta en el gran número de extinciones recientes en islas. En estas, más de 2,000 especies han desaparecido a nivel mundial debido a la pérdida de hábitat y a la introducción de depredadores en los últimos 10,000 años, eventos que siguieron a las primeras colonizaciones humanas (Steadman, 1995; Drake *et al.*, 2002; Steadman y Martin, 2003).

En la isla de Cozumel se tienen registradas cerca de 270 especies de aves. A pesar de su tamaño relativamente pequeño alberga la mayor variedad de especies invernantes así como de especies en tránsito; que luego de alimentarse, continúan su viaje hacia Centro y Sudamérica y otras islas del Caribe (CONANP, 2007; CONABIO, 2015).

En la propuesta de APFF Cenote Aerolito las aves son el grupo de vertebrados con el mayor número de especies registradas con 123 especies nativas (Anexo 1). Dentro de este grupo se encuentran 14 especies y subespecies consideradas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 como por ejemplo el loro frente blanca (*Amazona albifrons*) y el chivirín saltapared de Cozumel (*Troglodytes aedon* subsp. *beani*), especies Sujetas a protección especial; la paloma corona blanca (*Patagioenas leucocephala*) y el víreo de Cozumel (*Vireo bairdi*), especies Amenazadas, o el cuitlacoche de Cozumel (*Toxostoma guttatum*) y la garza rojiza (*Egretta rufescens*) especies En peligro de extinción, y seis especies prioritarias para la conservación (Anexo 2) (CONABIO, 2015; 2023a; CONANP-SEMARNAT, 2016; DOF, 2019).

Además, al igual que en la isla, en la propuesta de ANP existen diversas especies y subespecies de avifauna con algún grado de endemismo. Actualmente se han registrado 11 taxones endémicos, destacando microendemismos para Cozumel como el cardenal rojo de Cozumel (*Cardinalis cardinalis* subsp. *saturatus*), el chipe de Cozumel (*Setophaga petechia* subsp. *rufivertex*) o el colibrí esmeralda de Cozumel (*Cynanthus forficatus*), este último un importante polinizador de recursos florales dentro de la propuesta de ANP (Morales-Contreras *et al.*, 2020; CONABIO, 2023a).

La declaratoria del APFF Cenote Aerolito coadyuvará a la protección de la avifauna de Cozumel, uno de sus principales objetos de conservación de toda la isla, dada su riqueza y diversidad, así como elementos únicos a nivel nacional y mundial.

Mamíferos (Clase Mammalia)

Los mamíferos son uno de los grupos más conspicuos de las comunidades terrestres de vertebrados y poseen una serie de características internas y externas que los han llevado a ser exitosos en prácticamente todos los ecosistemas del mundo. En México los mamíferos forman un grupo





altamente diverso, ubicando al país en el tercer lugar mundial con 564 especies silvestres, alcanzando aproximadamente el 10% de la diversidad total (Sánchez-Cordero *et al.*, 2014; CONABIO, 2020a).

Esta riqueza mastofaunística adquiere más relevancia por el elevado número de endemismos (28% del total), de los cuales, los roedores es el que mayor número presenta (112 especies), seguido por los soricomorfos (20 especies) y los quirópteros (15 especies). Muchos de estos endemismos se han desarrollado en las islas mexicanas incluyendo Cozumel, que es una de las islas con más especies y subespecies endémicas, principalmente de roedores (Sánchez-Cordero *et al.*, 2014; CONABIO, 2022b).

Dentro de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado 13 especies de mamíferos nativos (Anexo 1), la gran mayoría murciélagos (10 especies), mismos que realizan importantes funciones ecológicas como la polinización de especies vegetales, dispersión de semillas y control biológico de plagas en los ecosistemas aledaños al cenote. Además, se han registrado una especie y una subespecie endémicos de la isla, el mapache de Cozumel (*Procyon pygmaeus*) y el tejón de Cozumel (*Nasua narica* subsp. *nelsoni*), especies que también están consideradas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 como especies en Peligro de extinción y Amenazada respectivamente (CONANP, 2007; CONANP-SEMARNAT, 2016; DOF, 2019; CONABIO, 2023a).

Conservación de especies prioritarias: mapache de Cozumel y tejón de Cozumel

Los carnívoros se encuentran entre los animales que han experimentado los descensos poblacionales más severos debido a actividades humanas como el cambio de uso de suelo, la fragmentación del hábitat, la caza y el comercio ilegal, conflictos con el ganado, enfermedades transmitidas por animales domésticos y la introducción de especies exóticas invasoras (Cardillo *et al.*, 2004, Di Minin *et al.*, 2016).

Los carnívoros insulares son especialmente vulnerables a la pérdida de sus poblaciones debido a las condiciones de aislamiento y distribución limitada por barreras geográficas. Especies como el mapache de Cozumel (*Procyon pygmaeus*) (Figura 44) o el tejón de Cozumel (*Nasua narica* subsp. *nelsoni*) a pesar de que sus parientes continentales son comunes y con amplia distribución, en Cozumel estas especies quedaron aisladas al perderse el contacto con el continente, adaptándose a los ecosistemas insulares. Al pasar miles de años, las condiciones particulares provocaron cambios morfológicos y conductuales que los diferenciaron física y genéticamente de sus congéneres del continente, convirtiéndose gradualmente por procesos evolutivo de especiación, en especies distintas (Ceballos y Oliva, 2005).

Evolutivamente, las especies insulares no tuvieron depredadores y las condiciones de hábitat particulares estaban limitadas geográficamente. Al ingresar el humano, introdujo especies que alteraron el hábitat de la biota nativa e impactaron negativamente a sus poblaciones. Además, la fragmentación y destrucción del hábitat ocasionado principalmente para la construcción de infraestructura turística ha sido muy perjudicial para las especies insulares.

Se sabe poco de la biología y ecología de ambas especies debido a sus bajas densidades, pero se han registrado en los bosques de mangle y humedales arenosos en el norte y costa oeste de la isla. También se sabe que la introducción de la boa (*Boa imperator*) ha tenido impactos negativos en su población, y junto con la pérdida y fragmentación del manglar constituyen las amenazas más





significativas para la supervivencia a largo plazo de estas especies insulares (Martínez-Morales y Cuarón, 1999; Ceballos y Oliva, 2005; González-Baca, 2006).

Cozumel ha sido un foco de desarrollo turístico que ha expandido últimamente su frontera urbana, particularmente en la costa oeste, aunque gran parte de la isla mantiene extensiones de bosques y manglar conservados. La permanencia del mapache y el tejón de Cozumel depende esencialmente de la disponibilidad de grandes extensiones de hábitat conectado, abundancia de presas y un estricto control de las actividades humanas que ejercen presión directa sobre los ecosistemas y sus especies.

El APFF Cenote Aerolito mantiene el hábitat para estas especies insulares y que, por la cercanía con los centros de desarrollo turístico, representa un sitio para promover la importancia de la conservación de la vegetación y biodiversidad en la isla. A pesar de las grandes extensiones de vegetación en buen estado de conservación en Cozumel, si las tendencias de crecimiento turístico no se revierten en el corto plazo potencialmente pueden fragmentar y provocar la extinción de biota endémica. Por lo anterior, el establecimiento del ANP APFF Cenote Aerolito sumará esfuerzos para proteger a uno de los sitios más importantes para la conservación de mamíferos endémicos en el país.



Foto: Cesar Hernández Hernández/Archivo CONANP

*Figura 44. Mapache de Cozumel (*Procyon pygmaeus*), una de las especies de mamíferos endémicas de la isla Cozumel y con presencia en la propuesta de APFF Cenote Aerolito.*





B) RAZONES QUE JUSTIFIQUEN EL RÉGIMEN DE PROTECCIÓN

México cuenta con casi dos millones de kilómetros cuadrados de superficie terrestre donde, dada la heterogeneidad de sus condiciones topográficas, fisiográficas y climáticas, existen 320 cuencas hidrográficas que albergan numerosos humedales incluyendo cenotes y sistemas cavernícolas asociados. Dada su alta riqueza biológica, su potencial para su conservación y los patrones sociales y económicos de las que son parte muchos de estos cuerpos de agua están considerados dentro de las Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP) identificadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (CONABIO, 2022c; 2022d).

Sin embargo, la integridad de los sistemas de aguas epicontinentales y su diversidad biológica se encuentran cada vez más amenazadas por las actividades humanas. Alrededor del 85% de las regiones hidrológicas de Latinoamérica y el Caribe, están consideradas como en estado crítico, en peligro o vulnerable. México no es la excepción ya que se calcula que se han perdido o degradado alrededor del 62% de sus humedales (Arriaga *et al.*, 2002; SEMARNAT, 2012; CONABIO, 2022d).

En particular, en vista de la importancia de los fenómenos biogeoquímicos y elevados números de endemismos en los cenotes de Cozumel, con énfasis en el cenote El Aerolito, es evidente la necesidad urgente de conservar estos ecosistemas y su biodiversidad dada su alta vulnerabilidad a impactos antropogénicos incluyendo los efectos del calentamiento climático global. Esta situación puede llevar a catastróficas consecuencias en la diversidad de especies de la propuesta de ANP, ya que tan solo un evento, antropogénico o natural, podría resultar en la desaparición de su biota única en el mundo.

Esta vulnerabilidad se acentúa dado el alto grado de endemismos y microendemismos, que le da relevancia no solo a nivel regional, sino mundial. Como ejemplo están los diferentes grupos de equinodermos que no han sido registrados en otras partes del mundo, y que son únicos de este ecosistema, además de biota que aún es desconocida para la ciencia, lo que justifica plenamente su protección a nivel federal (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son una de las principales estrategias empleadas para la conservación de los ecosistemas naturales y sus especies (González-Ocampo, *et al.*, 2014). Así, de acuerdo con el párrafo primero del artículo 44 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEPA), las ANP son zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en dicha Ley y los demás ordenamientos aplicables..

El éxito de las ANP como una herramienta para la conservación se basa en que están manejadas para proteger los valores ambientales que contienen. Para que el manejo sea efectivo debe estar hecho a la medida de las demandas y características específicas del sitio, debido a que cada ANP posee una variedad de características biológicas y sociales, presiones y usos particulares (CONANP, 2020a).

Conservar el patrimonio natural de México a través de las ANP, es una de las estrategias más efectivas para mitigar el cambio climático y sus efectos sobre los recursos naturales y la población, así como para contribuir a la adaptación, evitar el cambio de uso de suelo y la pérdida de carbono. Se calcula





que cerca del 15% del carbono del mundo está almacenado en los sistemas de áreas naturales protegidas (CONANP-PNUD, 2019).

Así, con base en el análisis y sistematización de la información técnica y científica recopilada para el cenote El Aerolito, su sistema de cavernas y ecosistemas adyacentes, así como recorridos en campo para el registro de la biodiversidad, valores ambientales, económicos y culturales la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas ha determinado que la propuesta de APFF Cenote Aerolito cumple con lo establecido en el artículo 45 de la LGEEPA, fracciones I a VII de acuerdo a lo siguiente:

ARTÍCULO 45.- El establecimiento de áreas naturales protegidas, tiene por objeto:

I. Preservar ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas y de los ecosistemas más frágiles, así como sus funciones, para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos;

II. Salvaguardar la diversidad genética de especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular preservar las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial:

III. Asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas, sus elementos, y sus funciones;

IV. Proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio;

V. Generar, rescatar y divulgar conocimientos, prácticas y tecnologías, tradicionales o nuevas que permitan la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional;

VI. Proteger poblados, vías de comunicación, instalaciones industriales y aprovechamientos agrícolas, mediante zonas forestales en montañas donde se originen torrentes; el ciclo hidrológico en cuencas, así como las demás que tiendan a la protección de elementos circundantes con los que se relacione ecológicamente el área; y

VII.- Proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas.

Conforme a lo anterior, y gracias al trabajo de investigación y exploración de espeleobuzos y científicos, así como instituciones e instancias académicas, los principales fenómenos bióticos y abióticos presentes en la propuesta de ANP, así como los servicios ambientales que proveen los ecosistemas que se pretenden conservar con la declaratoria del APFF Cenote Aerolito son:

- **Procesos de polinización.** El uso de hábitat y recursos, así como la polinización y dispersión de semillas por parte de aves y murciélagos, son procesos fundamentales que están presentes en las selvas y manglar dentro de la poligonal propuesta. Estos procesos ecológicos son uno de los primeros eslabones en el funcionamiento integral de los ecosistemas de la propuesta





de ANP, ya que aseguran la presencia y viabilidad de las comunidades vegetales aledañas, principal aporte de materia orgánica y energía al ecosistema.

- **Manglar.** La biodiversidad y abundancia de invertebrados cavernícolas en el cenote El Aerolito, está estrechamente relacionada con los aportes de materia orgánica y detritus de esta asociación vegetal que se encuentra asociada a la entrada del cenote, y que solo representa alrededor del 2% de la superficie total de la propuesta de ANP. La especie presente es el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), especie considerada como Amenazada de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010.
- **Tapetes bacterianos.** En las paredes y techo del cenote, zonas con altas concentraciones de materia orgánica, se desarrollan colonias de bacterias que son los primeros receptores de la materia orgánica de origen vegetal y detritus que ingresa al cuerpo de agua. Al desprenderse y caer al fondo, esta materia orgánica se dispersa en el sistema de cuevas subterráneas, y sostiene a una de las comunidades biológicas más *sui generis* en el mundo.
- **Sistema de cuevas inundadas.** Al interior del cenote se encuentra uno de los sistemas kársticos de conductos subterráneos anquihalinos más biodiversos del mundo con una conexión directa al mar. Dentro de este sistema, dados los procesos de erosión del CO² disuelto en el agua de lluvia sobre la roca caliza constituida casi en su totalidad por carbonato cálcico, se han formado diversos espeleotemas como estalactitas, estalagmitas y columnas en varios sitios del sistema, que además de ser un factor determinante en los componentes bióticos y abióticos, constituyen un elemento de inigualable belleza y valores estéticos.

El crecimiento de estas formaciones geológicas es muy lento, estimándose que para crecer 2.5 cm se requieren entre 4,000 y 5,000 años. La presencia de estas formaciones en el cenote El Aerolito, indica que la cueva estuvo seca por largos periodos de tiempo cuando el nivel del mar era menor que en la actualidad.

- **Procesos geohidrobiológicos y ciclos biogeoquímicos únicos.** Dada su particular interconectividad y formación de corrientes y flujos hídricos subterráneos que desembocan en el mar (solo dos de los 18 cenotes registrados en Cozumel tienen conexión marina), el sistema de cavernas de El Aerolito tiene un constante intercambio de materia orgánica, nutrientes y biota, entre el humedal y el mar Caribe. Se calcula que actualmente se han explorado 10,000 m de la red pasajes en este sistema kárstico.
- **Biota cavernícola.** Las condiciones bióticas y abióticas y procesos tan particulares que confluyen en el cenote El Aerolito hacen que este sistema subterráneo sea un laboratorio natural donde se pueden observar procesos evolutivos de especiación de organismos de origen marino, que en algún momento ingresaron al sistema cavernícola y encontraron las condiciones óptimas para desarrollarse, y a la larga separarse evolutivamente de sus ancestros, al grado de convertirse en nuevas especies totalmente adaptadas a las condiciones anquihalinas del sistema.





El cenote El Aerolito es considerado uno de los ecosistemas cavernícolas anquihalinos más biodiversos del mundo. En él se han registrado alrededor de 100 especies, lo que representa el 60% de la fauna anquihalina reportada a la fecha en México. Muchas de estas especies son registros nuevos para la ciencia, encontrándose en el sistema una inusual abundancia de esponjas, equinodermos y anélidos, siendo de hecho la cueva anquihalina con mayor riqueza de equinodermos en el mundo. El sistema alberga hasta ahora cinco especies que solo habitan en este sitio como la desmoesponja (*Amphibleptula aaktun*), la estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*), el ofiuero (*Ophionereis commutabilis*), el anfípodo (*Cymadusa herrerae*) y la cochinilla (*Cirolana adriani*), pudiendo aumentar el número conforme se identifiquen taxones a nivel de especie.

- **Biodiversidad terrestre y especies en la NOM-059-SEMARNAT-2010.** La biota terrestre que habita en las selvas y manglar de la propuesta de ANP es de suma importancia para el funcionamiento integral del ecosistema, principalmente en procesos clave como la polinización. En cuanto a los vertebrados, en el área de estudio se han registrado 162 especies nativas (23 peces, 3 reptiles, 123 aves y 13 mamíferos), 16 de ellas con algún grado de endemismo, como el mapache de Cozumel (*Procyon pygmaeus*) o el tejón de Cozumel (*Nasua narica* subsp. *nelsoni*), especie y subespecie respectivamente endémicas de Cozumel. También se ha registrado a nivel de especie un tunicado (Anexo 1).

De dichas especies, 23 están consideradas bajo alguna categoría de riesgo conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010, 14 están Sujetas a protección especial, 5 Amenazadas y 4 se encuentran En peligro de extinción (Anexo 2).

En general, con declaratoria del APFF Cenote Aerolito se protegerían a 293 especies en sus ecosistemas terrestres entre plantas vasculares y animales (vertebrados e invertebrados).

- **Conectividad ecológica y corredores de biodiversidad entre ANP.** La declaratoria como ANP de este importante ecosistema de Cozumel, complementará un corredor biológico fundamental para la conservación de los humedales y zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos en la isla, una zona de alta riqueza biológica considerada como prioritaria para su conservación.

Una buena correlación entre la inmigración y la migración de especies generará una elevada conectividad reflejándose en poblaciones sanas con menores riesgos de extinción; la modificación del hábitat en donde estas especies concurren y la modificación de su estructura poblacional debido a efectos antropogénicos como el cambio de uso de suelo y relleno de cuerpos de agua, factores que están directamente relacionados con la conectividad de las especies en cada sitio (Sale, 2006; Reveles-González, 2007).

La conectividad entre ANP y sus ecosistemas de influencia aumenta la resiliencia de los sistemas, tanto ecológicos como humanos. Las ANP han sido consideradas como sitios aislados donde se protegen valores naturales o culturales específicos. En este sentido, ante un contexto de cambio climático, el concepto de ANP se revaloriza, entendiendo a las áreas como





sitios que benefician y ayudan a incrementar la capacidad de adaptación de los ecosistemas y de las comunidades humanas ante el cambio climático (CONANP, 2015).

Con la declaratoria del APFF Cenote Aerolito, se tendría el primer sistema de ANP de México, conectadas e interrelacionadas de forma subterránea mediante un sistema de túneles entre el cenote y el mar Caribe, desembocando en la bahía de origen natural, conocida como La Caleta, y que es parte del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel.

Conforme a lo anterior, la categoría acorde a los principales objetos de conservación que son la biodiversidad endémica y microendémica que habita el cenote El Aerolito, así como los tapetes bacterianos y las asociaciones de manglar, además de los servicios ambientales que proporcionan en conjunto, es la de Área de Protección de Flora y Fauna, en concordancia con el artículo 54 de la LGEEPA, el cual establece:

ARTÍCULO 54.- Las áreas de protección de la flora y la fauna se constituirán de conformidad con las disposiciones de esta Ley, de la Ley General de Vida Silvestre, la Ley de Pesca y demás aplicables, en los lugares que contienen los hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres.

En dichas áreas podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia.

Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habiten en el momento de la expedición de la declaratoria respectiva, o que resulte posible según los estudios que se realicen, el que deberá sujetarse a las normas oficiales mexicanas y usos del suelo que al efecto se establezcan en la propia declaratoria.

C) ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS, ESPECIES O FENÓMENOS NATURALES

La presencia de especies endémicas y la estabilidad de la densidad poblacional entre el verano e invierno, así como las aún pocas evidencias de impacto antropogénico, que se limita a la línea permanente de vida en el cenote El Aerolito, sugieren un estado saludable de la biodiversidad al interior del sistema (Okolodkov, 2010; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Estudios recientes como los de Calderón-Gutiérrez *et al.* (2017; 2018), Brankovits *et al.* (2021) y Mejía-Ortiz *et al.* (2022), demuestran que en general los procesos biogeoquímicos que se desarrollan en el sistema de cuevas inundadas de la propuesta de ANP, así como los elementos bióticos y abióticos que los alimentan aún presentan una gran funcionalidad ecológica. Esto a pesar de las múltiples amenazas de origen antropogénico que han impactado en los últimos años al cenote y a los ecosistemas con lo que esta interconectado de forma terrestre y submarina (selvas, manglar, arrecifes), impactos que deben ser erradicados o reducidos en el corto y mediano plazo (Cervantes, 2007).

El cenote El Aerolito ha sido identificado como uno de los más ricos y biodiversos del mundo con alrededor de 100 especies cavernícolas registradas (60% de la fauna anquihalina de México), más de la



mitad nuevas para la ciencia, además de una abundancia inusual de esponjas, equinodermos y anélidos, siendo de hecho la cueva anquihalina con mayor riqueza de equinodermos en el mundo (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017).

El flujo de materia orgánica en el sistema a través de sus ductos, pasadizos y bóvedas, en conjunto con sus condiciones fisicoquímicas relativamente estables y geomorfología, resultan en un ecosistema en un estado de conservación extraordinario con una biota que solo existe ahí, y con condiciones tan particulares que son una “réplica” de las condiciones ambientales del mar a 3,000 m de profundidad, en completa oscuridad, convirtiéndolo en un laboratorio natural para el estudio de procesos de especiación y evolución en tiempos relativamente cortos (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2012; 2017).

Aunque en el cenote El Aerolito se han llegado a registrar concentraciones de coliformes fecales (NMP/100ml), muestreos y determinaciones fisicoquímicas, bacteriológicas y de metales pesados incluyendo parámetros como pH, demanda bioquímica de oxígeno (mg/L), nitratos (NO³ en mg/L), fosfatos (PO⁴ en mg/L), temperatura, turbidez (FAU/mensual) sólidos disueltos totales (en mg/L), oxígeno disuelto (OD en % de saturación), hidrocarburos (fracción media y ligera), metales pesados (DAP), salinidad, nitrógeno total, color, olor y nutrientes, señalan que en estos aún no se ven rebasadas las concentraciones indicadas en los criterios ecológicos y normas oficiales mexicanas (NOM) (FONATUR, 2018) (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos del agua del cenote El Aerolito registrados en 2017. No se ven rebasadas las concentraciones indicadas en los criterios ecológicos de calidad del agua en protección a la vida acuática. Tomado de: FONATUR (2018).

No.	Parámetro	Unidad	CENOTE AEROLITO (sep 2017)	CENOTE AEROLITO (nov 2017)	FRENTE COSTERO (sep 2017)	FRENTE COSTERO (nov 2017)	DARSENA (sep 2017)	DARSENA (nov 2017)
1	Temperatura	(°C)	27.9	27.5	29.8	28.9	30.5	29.7
2	Potencial hidrógeno		7.08	7.02	7.9	7.85	7.94	7.8
3	Coliformes fecales	(UFC/100mL)	147	81	215	49	174	91
4	Demanda bioquímica de oxígeno	(mg/l)	1.82	1.6	1.02	1.3	1.22	3.02
5	Nitratos	(mg/l)	0.57	1.4	0.29	1.18	0.41	1.2
6	Fosfatos solubles	(mg/l)	0.32	0.12	0.51	0.15	0.37	0.13
7	Turbiedad	(NTU)	0.65	0.5	0.2	0.3	0.5	0.45
8	Sólidos disueltos totales	(mg/l)	24840	24884	22035	23850	25450	25775
9	Oxígeno disuelto	(mg/l)	4.45	6.07	6.28	7.09	6.48	9.11
10	Salinidad	0/00	22	33.2	34.8	34.5	34.6	34.4
11	Nitrógeno total	(mg/l)	1.58	2.13	1.3	1.02	1.42	1.55
12	Color verdadero	(Pt Co)	0	0	0	0	0	0
13	Olor		Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro
14	Nitritos	(mg/l)	0	0	0	0	0	0
15	Arsénico	(mg/l)	< 0,0061	< 0.002	< 0,0061	< 0.002	< 0,0061	< 0.002
16	Cadmio	(mg/l)	< 0,004	< 0.003	< 0,004	< 0.003	< 0,004	< 0.003
17	Cobre	(mg/l)	< 0,0002	< 0.0001	< 0,0002	< 0.0001	< 0,0002	< 0.0001
18	Cromo	(mg/l)	< 0,021	< 0.01	< 0,021	< 0.01	< 0,021	< 0.01
18	Mercurio	(mg/l)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
19	Níquel	(mg/l)	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02
20	Plomo	(mg/l)	0.094	0.085	0.201	0.115	0.209	0.187
21	Zinc	(mg/l)	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
22	Cianuros	(mg/l)	< 0.022	< 0.017	< 0.022	< 0.017	< 0.022	< 0.017
23	Hidrocarburos fracción ligera	(mg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	Hidrocarburos fracción media	(mg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00





Por otro lado, los ecosistemas terrestres adyacentes al cenote El Aerolito, selva baja subperennifolia y manglar muestran ensamblajes ecológicos funcionales dada la presencia de una comunidad de importantes polinizadores y dispersores de semillas en selvas tropicales, como son las aves y murciélagos. Estos grupos tienen una función ecológica vital en la propuesta de ANP, ya que son en gran parte responsables de mantener la estructura y funcionalidad de la vegetación al polinizar (colibríes y murciélagos), dispersar germoplasma y controlar poblaciones de insectos (murciélagos). Dada la disponibilidad de recursos, el cenote El Aerolito es un sitio donde se ha registrado una intensa actividad de forrajeo de varias especies de murciélagos, por encima de los hábitats aledaños (Mendoza, 2011; Rincón, 2013; Morales-Contreras *et al.* 2020).

Aunque por el momento el sistema subterráneo no ha tenido graves impactos directos y sus condiciones ambientales se mantienen estables, desde hace algunos años se han registrado variaciones en algunos parámetros fisicoquímicos por actividades de origen antropogénico (servicios turísticos principalmente) en una de las zonas clave para el ecosistema subterráneo del Aerolito, la marina La Caleta. Este es el único puerto natural de Cozumel y el puerto más antiguo. Históricamente ha resguardado embarcaciones que prestan servicios turísticos en la zona (INE-SEMARNAP, 1998; FONATUR, 2020).

Por ejemplo, en las playas cercanas a La Caleta la concentración de bacterias coliformes tiene valores elevados y es mayor que en el margen occidental de la isla, estos aportes de materia orgánica probablemente provienen de aguas residuales y/o lixiviados de la infraestructura aledaña (hoteles y marina para embarcaciones). También se han registrado concentraciones de amonio con máximos valores en sitios próximos a desarrollos turísticos (4.58 mg/l) y parámetros altos de turbiedad, que en conjunto han hecho que la calidad del agua de La Caleta se considere contaminada (INE-SEMARNAP, 1998; FONATUR, 2018).

En general el estado de conservación de los ecosistemas, especies y ciclos naturales presentes al interior de la poligonal de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se considera muy bueno, lo que se ve reflejado en la riqueza y diversidad de especies, procesos biogeoquímicos activos y servicios ambientales.

La conectividad entre los diferentes ecosistemas adyacentes, terrestres y marinos es vital para mantener el estado de conservación e integridad del ecosistema, ya que, desde la polinización del manglar, la interacción y el aporte energético de la materia orgánica de esta vegetación al cenote, los tapetes bacterianos que la ingresan al sistema, las haloclinas y la biota cavernícola están íntimamente relacionados en la dinámica y flujo de energía del cenote El Aerolito.

D) RELEVANCIA, A NIVEL REGIONAL Y NACIONAL, DE LOS ECOSISTEMAS REPRESENTADOS EN EL ÁREA PROPUESTA

Cozumel es una isla oceánica de origen coralino, que nunca estuvo conectada al continente. Este aislamiento convirtió a sus ecosistemas terrestres y cavernícolas en un lugar propicio para la generación de endemismos, ya que, a lo largo de miles de años, sus poblaciones han evolucionado en forma independiente, resaltando la presencia de más de 30 especies y subespecies de vertebrados endémicas a la isla, así como 100 taxones de invertebrados cavernícolas (CONANP-SEMARNAT, 2016; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017).





Si bien existen muchos ecosistemas subterráneos costeros en la península de Yucatán, la peculiaridad del APFF Cenote Aerolito radica en que en esta propuesta de ANP existen especies únicas en el país y el mundo, incluyendo once especies y subespecies que solo habitan en Cozumel, y lo más importante al menos cinco especies de invertebrados que son microendémicos de este sistema inundado, incluyendo a la única estrella de mar cavernícola del mundo (*Copidaster cavernicola*). También existen especies cuyos congéneres más cercanos se encuentran situados en diversas partes del mundo como es el caso del camarón (*Procaris mexicana*), que su especie más cercana se encuentra en las cuevas de lava de Hawaii, EUA. Así, la propuesta de APFF Cenote Aerolito alberga a la cueva anquihalina más biodiversa del mundo con 100 taxones, 70 identificados a nivel de especie. En este cenote se ha registrado el 60% de la fauna anquihalina de México, siendo Echinodermata, Annelida y Porifera los grupos más ricos en contraste con el resto de los sistemas cavernarios del mundo donde el filo dominante es Arthropoda. De hecho, se considera al cenote El Aerolito como la cueva anquihalina con más riqueza de equinodermos en el mundo con 31 especies identificadas actualmente.

El cenote El Aerolito es de gran relevancia a nivel local, ya que es parte de una red de humedales costeros y marinos con una estrecha conectividad, que vincula diversos ecosistemas y procesos ecológicos, tanto en sus ecosistemas terrestres como subterráneos, en un área extremadamente pequeña, a través de una conexión directa con el mar Caribe. Solo dos cenotes (El Aerolito y La Quebrada), de los 18 registrados en la isla Cozumel, tienen conexión directa con el mar.

Con la declaratoria del APFF Cenote Aerolito, se creará el primer sistema de ANP a nivel nacional y probablemente mundial, conectado e interrelacionado de forma subterránea, iniciando la dinámica del sistema en la entrada al cenote El Aerolito, pasando por un túnel inundado de 240 m, que desemboca en una bahía en la costa poniente, conocida como La Caleta, dentro del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. En esta zona comienza la dispersión de los nutrientes y materia orgánica que nutre al arrecife Paraíso y a los ecosistemas de pastos marinos aledaños.

D.1) CONTRIBUCIÓN DEL ÁREA ANTE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

D.1.1) Las áreas naturales protegidas como soluciones al cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) identifica dos opciones para hacer frente al cambio climático: la mitigación y la adaptación. La mitigación se refiere a la intervención humana para reducir las emisiones o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero; mientras que la adaptación se refiere a procesos de ajuste al clima real o esperado y a sus efectos, para moderar el daño o aprovechar oportunidades benéficas (CMNUCC, 1992; IPCC, 2021).

En este sentido las ANP, además de proteger ecosistemas y especies, son soluciones naturales al cambio climático, ya que en cuanto a la mitigación, contribuyen de manera importante a la captura y almacenamiento de carbono; mientras que en cuanto a la adaptación, los ecosistemas protegidos pueden reducir los impactos por eventos hidrometeorológicos extremos y mantienen los servicios ecosistémicos, como la regulación de la temperatura, la provisión de agua, entre otros; los cuales contribuyen a reducir la vulnerabilidad al cambio climático (CONANP, 2015).

Estos sitios representan una oportunidad para conservar el patrimonio natural de México, fortalecer la economía y mejorar el bienestar humano, lo que permite que las comunidades más vulnerables





estén mejor preparadas para enfrentar las amenazas del cambio climático. Además, las ANP representan una oportunidad para conservar el patrimonio natural de México y sitios de belleza inigualable, además de fortalecer la economía y mejorar el bienestar humano, lo que permite que las comunidades más vulnerables estén mejor preparadas para enfrentar las amenazas del cambio climático. La protección de los ecosistemas, a través del decreto de nuevas ANP, permite mantener o mejorar la calidad de los procesos ecológicos, dando como resultado espacios naturales con mayor capacidad de recuperación, que podrán amortiguar mejor los impactos del cambio climático y mantener los diversos e intrincados procesos bióticos y abióticos, como por ejemplo los que se desarrollan en la superficie y el sistema de cuevas subterráneas de la propuesta de APFF Cenote Aerolito, que sostienen una biota única en el mundo.

Por otra parte, el establecimiento de estos instrumentos de conservación favorece la conectividad del paisaje, atributo que permite que los organismos puedan migrar hacia sitios que tendrán características favorables para su supervivencia ante condiciones cambiantes provocadas por el cambio climático. Las ANP constituyen la estrategia de gestión más efectiva para impedir el cambio de uso de suelo, con lo que se evita la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera. Estos espacios no son los únicos instrumentos de conservación que cumplen estas funciones; sin embargo, ofrecen ventajas únicas, ya que tienen fronteras definidas, poseen claridad legal, cuentan con un amplio respaldo nacional e internacional, además de ser instrumentos efectivos y de bajo costo. El decreto y protección de las ANP contribuye a aumentar la capacidad de adaptación de los ecosistemas y mitigar el cambio climático, a través de los ecosistemas naturales, con la participación multisectorial coordinada en los distintos niveles de gobierno (CONANP, 2015).

D.1.2) Contribución del APFF Cenote Aerolito a la mitigación del cambio climático

Los ecosistemas saludables juegan un papel de gran importancia no solo para la diversidad biológica sino también por su capacidad natural de fijar y absorber el dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero (GEI) que provoca el calentamiento global y que es generado por diferentes actividades humanas como los procesos industriales, el uso indiscriminado de combustibles fósiles y la deforestación y cambio de uso de suelo. Así, los ecosistemas durante su desarrollo pueden absorber el CO₂ de la atmósfera y convertirlo en carbono que se almacena principalmente en los troncos, raíces, hojas y suelo. Este proceso contribuye a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, la destrucción y degradación de ecosistemas provoca la liberación del carbono a la atmósfera contribuyendo a agravar el problema del cambio climático (CONAFOR, 2017).

La mitigación de los GEI, a través de los ecosistemas en ANP, implica evitar las pérdidas de carbono de los ecosistemas, por ejemplo, debido a incendios y degradación, así como el mantenimiento de la cobertura vegetal para la captación y almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, esta última fundamental para mantener a las cadenas alimentarias cavernícolas del sistema de cuevas inundadas del cenote El Aerolito. La zona de interés está inmersa en ecosistemas prioritarios como manglares y selvas bajas y medianas subperennifolias, que contribuyen a la captura y almacenamiento de carbono en la región (CICC, 2017).

Por otro lado, los humedales costeros son importantes sumideros de carbono, y en cuanto a la mitigación de gases de efecto invernadero, se reconoce su capacidad para capturar carbono a una





tasa anual de dos a cuatro veces mayor que la de los bosques tropicales maduros, y almacenan entre tres y cinco veces más carbono por unidad de área, aunque cubren menos del 0.5% de la superficie marina mundial. Además, el sedimento en estos ecosistemas acumula hasta un 50% del total de carbono de sedimentos oceánicos. La cantidad de carbono que secuestran en un año equivale a casi la mitad de las emisiones producidas por el transporte a escala mundial. Debido a esta gran importancia, el carbono acumulado en estos ecosistemas, junto a las praderas de pastos marinos, se designa de forma independiente como “carbono azul” (CONANP-SEMARNAT, 2017).

Considerando lo anterior, la declaratoria del APFF Cenote Aerolito contribuirá a conservar y conectar los ecosistemas aledaños (terrestres y subterráneos), previniendo los procesos de pérdida de cobertura vegetal, y por consiguiente del carbono almacenado en biomasa aérea y el sistema cavernícola. Esto es, el ANP ayudará a limitar la presión general sobre los ecosistemas en sus inmediaciones.

Así, el potencial de captura y almacenamiento de carbono de los ecosistemas en la eventual ANP contribuirá al cumplimiento de los compromisos internacionales de México referentes a la mitigación del cambio climático. En este sentido, la incorporación de ecosistemas a esquemas de conservación, se considera una acción para la mitigación en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el Acuerdo de París y en los instrumentos de la política nacional en la materia, particularmente en lo referente al incremento de la superficie decretada como ANP a nivel federal, contemplado en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 (PECC) y la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) (SEMARNAT, 2013; SEMARNAT-INECC, 2022).

Lo anterior tiene concordancia también con instrumentos estatales, pues el estado de Quintana Roo cuenta con un Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático y la Ley de Acción de Cambio Climático estatal, siendo ambas herramientas clave que se unen a los compromisos nacionales e internacionales en materia de mitigación del cambio climático (GQROO, 2013; *et al.*, 2013).

D.1.3) Contribución del APFF Cenote Aerolito a la adaptación ante el cambio climático

La región del Caribe enfrenta diversas amenazas climáticas actuales y potenciales en un contexto de cambio climático que podrían tener impactos significativos en los ecosistemas y en la población, las actividades económicas e infraestructura estratégica. Por ello, resulta esencial la implementación de acciones de adaptación al cambio climático que permitan reducir la vulnerabilidad de estos elementos del territorio. Uno de los enfoques para la reducción de la vulnerabilidad es el de Adaptación Basada en Ecosistemas, el cual contempla el uso de los servicios ecosistémicos para ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático (Lhumeau y Cordero, 2012).

Por lo tanto, la creación de nuevas ANP en la zona contribuirá a la conservación, restauración y aprovechamiento sostenible de los ecosistemas, una acción clave de adaptación basada en ecosistemas. En la Tabla 7 se presentan las problemáticas climáticas reconocidas para la región donde se establecerá la nueva ANP, así como los principales servicios ecosistémicos que podrían ayudar a reducir su vulnerabilidad ante las mismas. Los servicios ecosistémicos que se presentan fueron seleccionados a partir de los listados de Lhumeau y Cordero (2012), y Everard y colaboradores (2020).



Tabla 7. Principales efectos climáticos observados y potenciales para los sistemas de interés (Lhumeau y Cordero (2012), Locatelli (2016) y Everard et al., 2020).

Efectos históricos y potenciales de eventos climáticos	Servicios ecosistémicos con que el APFF Cenote Aerolito puede contribuir a reducir la vulnerabilidad de la región ante los efectos climáticos
Aumento del nivel del mar	+ Protección de la línea de costa y retención de sedimentos. + Barrera física contra marejadas.
Afectaciones por altas temperaturas	+ Regulación de la temperatura a través de la sombra y evapotranspiración de la vegetación de selva y manglar.
Afectaciones por vientos fuertes durante tormentas tropicales	+ Barrera ante vientos.
Afectaciones por inundaciones	+ Infiltración de agua. + Barreras naturales ante corrientes de agua.
Afectaciones por deslaves y erosión costera	+ Retención de suelos.
Enfermedades infecciosas y plagas	+ Control biológico de plagas y de vectores de enfermedades. + Aprovechamiento de plantas medicinales. + Mantenimiento de hábitat para evitar contacto con la fauna silvestre. + Diversidad genética.
Afectación a actividades económicas	+ Posibilidad de diversificar actividades.

Tomando en cuenta lo anterior, la declaratoria del APFF Cenote Aerolito aumentará la capacidad de resiliencia de los ecosistemas costeros de la isla de Cozumel y coadyuvará a mantener la viabilidad de los servicios ambientales que estos ecosistemas proporcionan a la población.

El establecimiento del APFF Cenote Aerolito, con una conectividad submarina directa con el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, abonará a que ambos ecosistemas tengan mayor capacidad de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, ya que a través de la conservación se espera que los hábitats cuenten con mayor integridad en su estructura y función para seguir proveyendo las condiciones necesarias tan particulares en las que se desarrolla la biota de este ecosistema, además de permitir así la conectividad con otros ecosistemas (marinos y terrestres) para favorecer el movimiento de las especies en un contexto de cambios en el clima (Mansourian et al., 2009).

A su vez, los ecosistemas en buen estado de conservación pueden tener mayor capacidad de recuperarse de eventos como ondas de calor, fenómenos hidrometeorológicos, proliferación de plagas y enfermedades e incendios forestales, aunque por su diversidad de especies sensibles a perturbaciones pueden tener una menor resistencia, por lo que es importante la conectividad entre áreas para facilitar el movimiento de estas especies (Côté y Darling, 2010).

En el caso de la biota del cenote El Aerolito, que cuenta con especies únicas que se desarrollan en condiciones particulares, esta capacidad de resiliencia es fundamental, ya que la zona se encuentra fuertemente amenazada por la contaminación del agua proveniente de la marina La Caleta,



principalmente hidrocarburos, además de la infraestructura hotelera y de servicios en sus cercanías, actual y proyectada. Por lo que resulta esencial su conformación para limitar los impactos antrópicos y de cambio climático en este singular ecosistema cavernícola (DGCS-UNAM, 2013).

Adicionalmente, el establecimiento del ANP constituye una acción de adaptación al cambio climático de gran impacto, siendo congruente con lo acordado en tratados internacionales y la política nacional de adaptación, contemplada en diferentes leyes e instrumentos en la materia, además de estar vinculadas y armonizadas con instrumentos estatales y municipales que contemplen la implementación de medidas y acciones de adaptación al cambio climático.

E) ANTECEDENTES DE PROTECCIÓN DEL ÁREA

En el estado de Quintana Roo hay 40 áreas naturales protegidas, 20 federales por decreto, nueve federales destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC), 10 estatales y una municipal, que cubren más de 1 millón de hectáreas (terrestres) y representan aproximadamente el 22% de la superficie del estado, en la que están representados ecosistemas de alto valor ecológico: selvas, humedales, dunas costeras, arrecifes, sistemas de cuevas y cavernas.

En la propuesta de área natural protegida APFF Cenote Aerolito, no se identifican antecedentes de protección, sin embargo, en la isla Cozumel se encuentran seis ANP, tres estatales y tres federales relacionadas e interconectados de una u otra forma con la zona de interés: las ANP federales Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano, el Área de Protección de Flora y Fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel y el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y las ANP de carácter estatal Parque Natural Laguna Chankanaab, Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia y la Reserva Estatal Selvas y Humedales de Cozumel (Tabla 8 y Figura 45). Es importante señalar que la zona de interés se ubica en la UGA CP1- CENTRO DE POBLACIÓN 1 de acuerdo con el Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) del Municipio de Cozumel, Quintana Roo, publicado en el Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo el 21 de octubre de 2008, el cual expresamente señala que “se prohíbe cualquier tipo de construcción o modificación en cenotes, cavernas y dolinas” (POE Qroo, 2008).

Tabla 8. Áreas naturales protegidas de carácter federal y estatal en la Isla de Cozumel cercanas a la propuesta de APFF Cenote Aerolito.

No	Categoría	Nombre	Municipio	Superficie (ha)	Decreto
ANP de carácter federal					
1	PN	Arrecifes de Cozumel	Cozumel	11,987.8750	19/07/1996
2	APFF	La porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel	Cozumel	37,829.170054	25/09/2012
3	RB	Caribe Mexicano	Frente a las costas de Puerto Morelos	5,754,055.363160	07/12/2016
ANP estatales					
4	PN	Laguna Chankanaab	Cozumel	9.231513	26/09/1983
5	RE	Selvas y Humedales de Cozumel	Cozumel	19,846.450	01/04/2011
6	PEE	Laguna Colombia	Cozumel	1,130.643899	07/04/2011

ANP federales: **APFF** Área de Protección de Flora y Fauna, **PN** Parque Nacional, **RB** Reserva de la Biósfera.

ANP estatales: **PN** Parque Natural, **PEE** Parque Ecológico Estatal **RE** Reserva Ecológica.

* Solo se mencionan las ANP cercanas a la propuesta.

** ANP local inmersa parcialmente en la propuesta.



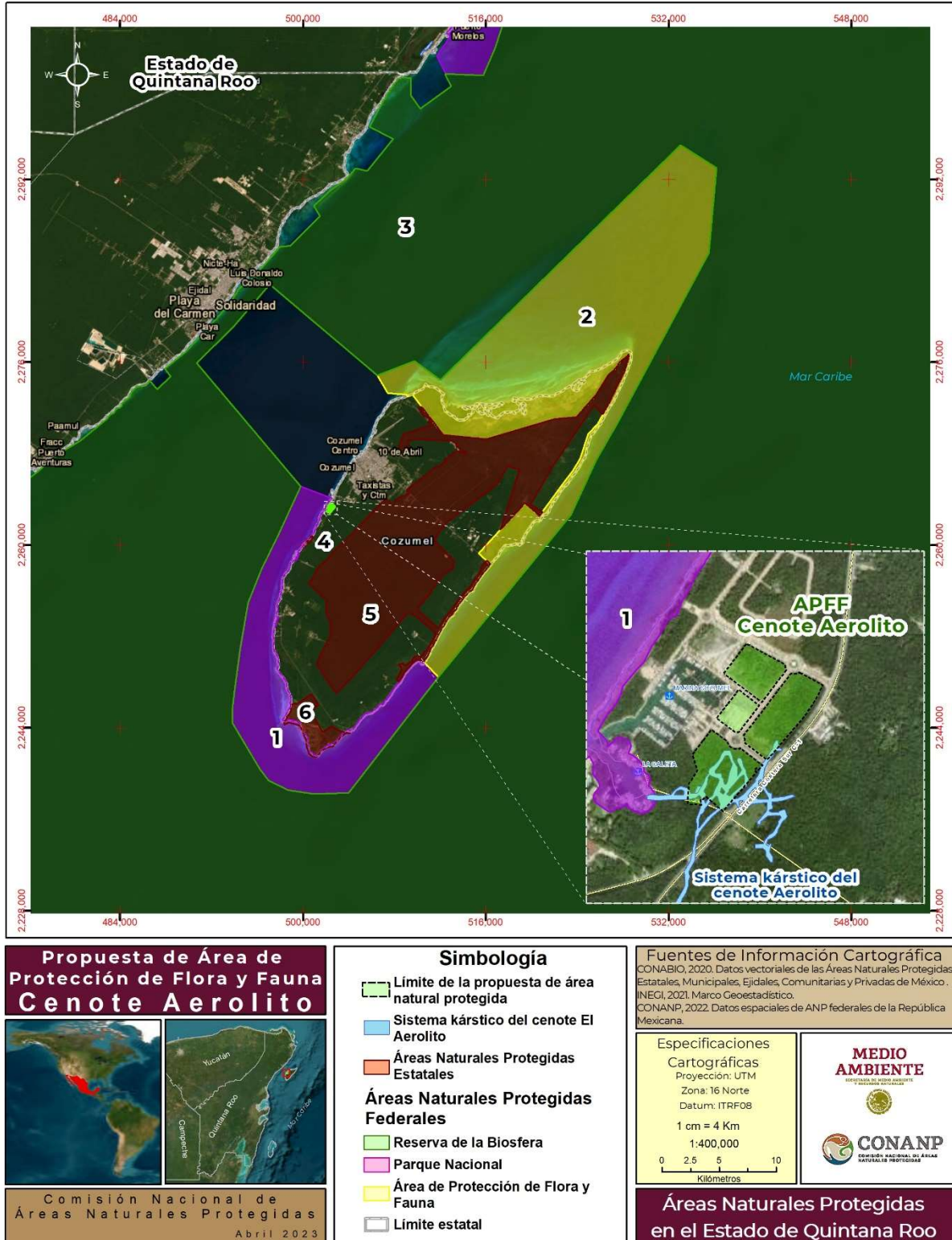


Figura 45. Áreas naturales protegidas de carácter federal y estatal ubicadas en Cozumel, Quintana Roo.





F) UBICACIÓN RESPECTO A LOS SITIOS PRIORITARIOS PARA LA CONSERVACIÓN DETERMINADAS POR LA COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD

En la propuesta de APFF Cenote Aerolito convergen diversos estudios de regionalización biótica realizados por la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad en coordinación con diferentes instituciones, conforme a lo siguiente:

Ecorregiones terrestres

La diversidad biológica de México se expresa como un complejo mosaico de distribución de especies y ecosistemas. Esta complejidad biológica se explica por la gran heterogeneidad del medio físico mexicano, que a su vez es producto de su variada fisiografía e intrincada historia geológica y climática. La riqueza de especies y endemismos de cada grupo taxonómico no son uniformes a lo largo de nuestro país, sino que muestran tendencias biogeográficas que se aprecian en la composición actual de comunidades bióticas y ecosistemas, así como en los patrones de regionalización biológica y ecológica a lo largo y ancho del país (Espinosa y Ocegueda, 2008).

Derivado de lo anterior, México ha sido regionalizado en provincias biogeográficas, ubicando al estado de Quintana Roo en la denominada “Provincia del Petén”. La provincia se ubica desde el sureste de la Península de Yucatán y se extiende hasta el Petén de Guatemala y Belice, donde se localiza la propuesta de APFF Cenote Aerolito. En dicha provincia se presenta una precipitación pluvial de alrededor de 1,800 mm anuales, lo que, junto con otras características geológicas, tipos de suelo y la presencia del Mar Caribe, determina que la vegetación dominante esté constituida mayormente por selvas húmedas, las cuales se caracterizan por una elevada densidad de especies arbóreas, temperaturas cálidas y alta humedad (CONABIO, 1997; Espinosa y Ocegueda, 2008; Ek, 2011; Valdez-Hernández e Islebe, 2011).

Por otro lado, en términos ecológicos, nuestro país ha sido dividido en 51 ecorregiones (la nación de Latinoamérica con el mayor número), las cuales son áreas que contienen un conjunto geográficamente distintivo de comunidades naturales que comparten la gran mayoría de sus especies, dinámicas y procesos ecológicos. El estado de Quintana Roo, incluyendo a la isla de Cozumel pertenecen a la ecorregión nivel I “Selvas cálido-húmedas” (Challenger y Soberón, 2008, INEGI-CONABIO-INE, 2008; CONABIO, 2022f) (Figura 46).

Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS)

Las AICA son áreas prioritarias que destacan por su importancia en el mantenimiento a largo plazo de las poblaciones de aves que ocurren de manera natural en ellas y se clasifican de acuerdo con las características de las poblaciones de aves que albergan, incluyendo endemismos y categorías de riesgo (Arizmendi y Berlanga, 1996; Arizmendi y Márquez, 2000).

La propuesta de APFF Cenote Aerolito se encuentra inmersa en su totalidad dentro del AICA 178: Isla Cozumel, en la cual se han registrado 269 aves, tanto residentes como migratorias. La importancia de la avifauna de Cozumel radica en que varias de estas especies y subespecies son endémicas ya sea la





de península de Yucatán o de la isla de Cozumel, algunas de ellas presentes en los ecosistemas adyacentes al cenote El Aerolito (CONABIO, 2015) (Figura 47).

Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales para la conservación de la biodiversidad

Los ecosistemas acuáticos han sido los primeros en recibir los desechos e impactos de las diferentes actividades antropogénicas, entre los factores que contribuyen a la destrucción y modificación de estos sistemas se encuentra la transformación de los ecosistemas (cambio de uso del suelo), la sobreexplotación del agua, la contaminación de cuerpos de agua, la alteración de los flujos de agua por presas, bordos y canales, y la introducción de especies exóticas invasoras que causan severos impactos a los ecosistemas y desplazan a las especies nativas. La pérdida de la biodiversidad acuática epicontinental y de los recursos hídricos tiene como consecuencia la pérdida de bienes y servicios ambientales de suma importancia para las comunidades humanas (Lara-Lara *et al.*, 2008; CONABIO, 2021a).

Bajo esta perspectiva, una de las estrategias para el mantenimiento de estos ecosistemas es la conservación y manejo sustentable de áreas vinculadas por los procesos clave del ciclo del agua. En este sentido, la CONABIO identificó un conjunto de sitios prioritarios para la conservación acotados a los ambientes acuáticos epicontinentales (SPAE) que abarcan cerca del 29% de la superficie del país, de los cuales más del 15% se encuentran en ANP y 21.7% de ellos son sitios de prioridad extrema (CONABIO y CONANP, 2010; Lira-Noriega *et al.*, 2015).

Los SPAE son una herramienta valiosa y útil para dirigir los esfuerzos de conservación, rehabilitación y manejo sustentable de los ecosistemas acuáticos del país.

De acuerdo con lo anterior, en la propuesta de APFF Cenote Aerolito se ubica completamente inmerso en un SPAE de prioridad extrema, lo que refuerza la necesidad urgente de proteger este humedal, sus ecosistemas y biota asociada, así como lo múltiples servicios ambientales que proveen (CONABIO, 2021a) (Figura 48).



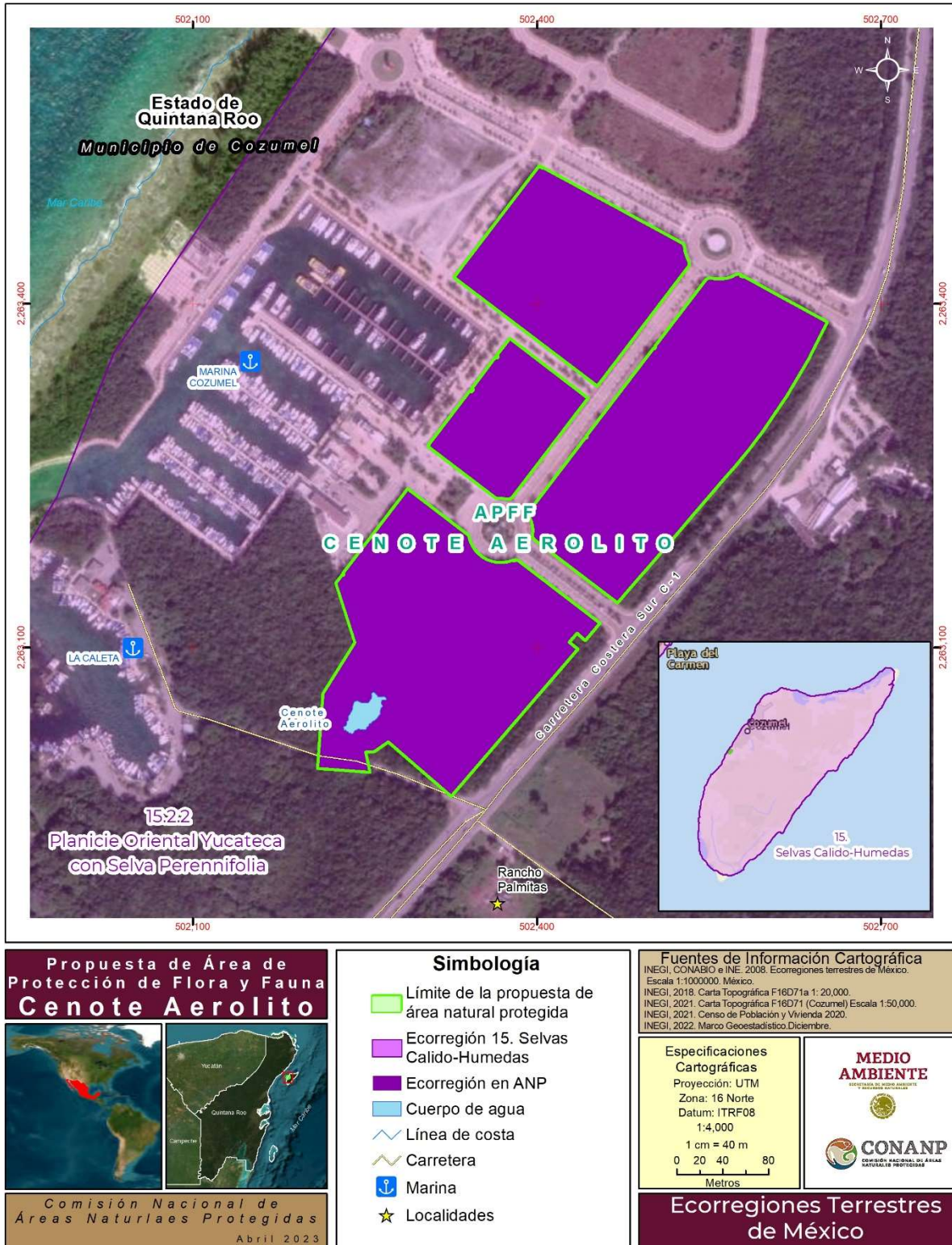


Figura 46. Ecorregión terrestre 15. Selvas cálido-húmedas que abarca la totalidad de Quintana Roo, incluyendo a la isla de Cozumel y la propuesta de APFF Cenote Aerolito.



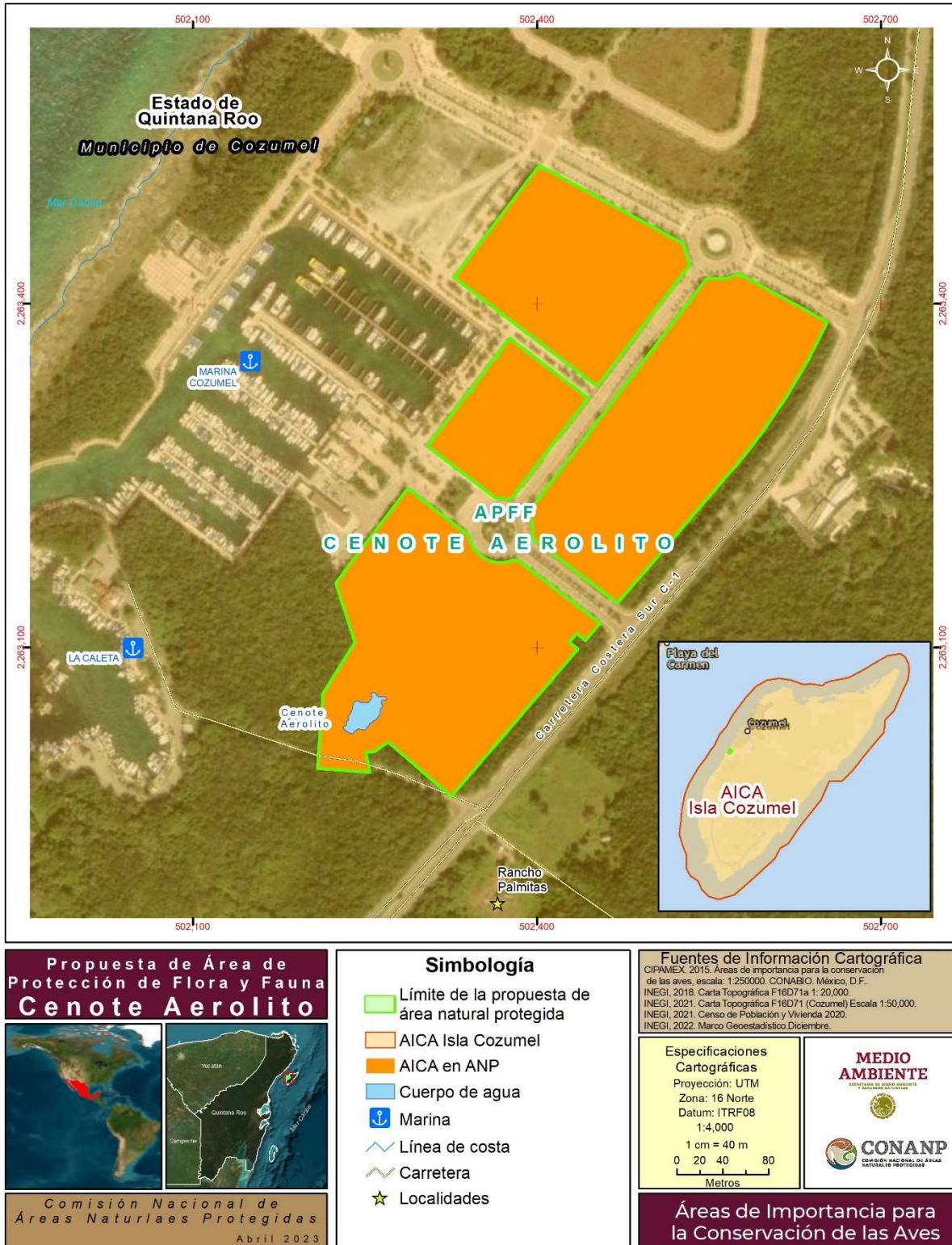


Figura 47. Área de Importancia para la Conservación de las Aves 178: Isla Cozumel, que abarca la totalidad de la isla donde existe un alto grado de endemismo a nivel de especies y subespecies.





Figura 48. La propuesta de APFF Cenote Aerolito se ubica en un sitio prioritario acuático epicontinental para la conservación de la biodiversidad de prioridad extrema, lo que indica la necesidad de protegerlo.



III. DIAGNÓSTICO DEL ÁREA

A) CARACTERÍSTICAS HISTÓRICAS Y CULTURALES

A.1) HISTORIA DEL ÁREA

Arqueológicamente la isla de Cozumel se circunscribe dentro del área cultural denominada Costa Nororiental de la Península de Yucatán. Cozumel, cuyo nombre antiguo es “Cuzamil”, que traducido del maya significa “Nido de golondrinas”, es una de las islas más visitadas del mundo que tuvo su fase de apogeo hace más de mil años cuando fue un centro de culto a Ixchel, diosa maya de la fertilidad y la Luna, durante el período Epiclásico alrededor del año 900 e. a. Cozumel, además de su referente ritual, fue también un puerto importante para el intercambio y comercialización de la cultura maya.

La navegación maya por la costa oriental de la península de Yucatán fue de cabotaje, esto significa que no se alejaban de la costa, por eso es de suponer que en la isla de Cozumel esta actividad alcanzó su apogeo durante el período Posclásico a lo largo de la costa del Mar Caribe. Los mayas se valieron de puertos de abrigo para refugiarse en caso de mal tiempo como los había es de suponerse, en la isla de Cozumel (Figura 49).

Estas rutas de navegación también incluían refugios naturales como caletas y lagunas. Los navegantes estaban atentos a puntos geográficos de referencia en tierra que les ofrecían información de su ubicación y conocían la posición de los arrecifes para no encallar en ellos. En suma, este acervo de conocimiento marítimo permitió, con el tiempo, el establecimiento de una nutrida ruta comercial bien definida que llevó a un control, distribución y comercio de bienes de diferentes regiones de la península de Yucatán y por ende la posibilidad de intercambios culturales.



Figura 49. Rutas de comercio maya en la península de Yucatán durante el período Posclásico. La línea roja marca la navegación de cabotaje. Se destaca la isla de Cozumel donde se ubica la propuesta de APFF Cenote Aerolito. Tomado de Revista Arqueología Mexicana.





De la costa eran importantes productos como la sal, conchas, caracoles y pescado seco, entre otros bienes que se podían intercambiar por productos de otras regiones como la obsidiana, la piedra verde, el pedernal, las plumas y las mantas de algodón. Se sabe que los mayas navegaban desde tiempos antiguos, ya que algunas islas alejadas varios kilómetros de la costa fueron pobladas desde el período Preclásico Tardío (300 a. C- 300 d. e.). La actividad naviera se incrementó con el paso del tiempo y para el período Postclásico ya se tenía desarrollada una gran ruta comercial que rodeaba a la península de Yucatán, llegaba al Golfo de México por la costa oeste y hasta Honduras por la costa oriental del Mar Caribe. Las rutas marítimas se combinaban con otras redes fluviales.

Antes de que los navíos de Juan de Grijalva navegaran por el Golfo de México, el 3 de mayo de 1518, avistaron la isla de Cozumel, a la que llamaron Santa Cruz de Puerta Latina, por haberse descubierto en el día de la Santa Cruz. El 6 de mayo de ese año, el capellán de la expedición fray Juan Díaz, celebró misa justamente en el oráculo dedicado a la diosa lunar Ixchel, de ese oráculo maya no queda evidencia alguna, aunque se ha identificado el lugar y en el sitio se ha construido recientemente la capilla de Santa Cruz de Cuzamil, para conmemorar los 500 años de la primera misa oficiada en México. Conmemoración equivocada porque la primera misa se celebró en marzo de 1517 en el Gran Cairo (Montero, 2020).

La expedición de Hernán Cortés dejó las costas de Cuba el 10 de febrero de 1519, la flota se componía de 11 naves, sus capitanes habían acordado reunirse en la isla de Cozumel en caso de dispersarse por algún temporal cruzando el Canal de Yucatán —como sucedió—, pues varios de sus pilotos y marinos conocían la isla ya que un año antes habían acompañado a Juan de Grijalva. Se colocó un altar y se levantó una cruz en Cozumel el 14 de febrero, en la que fue la primera misa oficiada por la expedición de Cortés. Memorable es el hecho de que la expedición de Cortés rescata al naufrago Jerónimo de Aguilar, quien en 1511 llegó a estas costas. Gracias a que Jerónimo de Aguilar vivió entre los mayas por ocho años, aprendió su lengua y se convirtió en su traductor e intérprete (Montero, 2020).

Tiempo después los mestizos y mayas abandonaron la isla de Cozumel, quedando deshabitada hasta 1848 en que un grupo de mestizos escapando de la guerra de castas en la península de Yucatán volvió a habitar la isla, dedicándose para su subsistencia a la pesca, una agricultura incipiente y la extracción maderera de cedro. Actualmente es uno de los destinos turísticos más importantes del mundo.

A.2) ARQUEOLOGÍA

Por diversas referencias no académicas, así como reportes y registros aún no publicados, se tiene noticia de que al interior del sumidero se han localizado restos de fauna del Pleistoceno y vestigios (tiestos) de grupos mayas de los últimos dos milenios, depositados en el cenote como probables ofrendas.

La megafauna de la Era de Hielo que se ha encontrado en Quintana Roo ha sido registrada muy adentro de cuevas inundadas y se ubica cronológicamente en el Pleistoceno tardío llamado Tarantiense. Sus límites cronométricos se sitúan entre 126 mil y 11 mil años antes del presente. Al igual que los fósiles hallados en los sistemas de cavernas inundadas de Tulum, los restos de la paleofauna en el cenote El Aerolito, corresponderían a especies que habitaban la región durante la última





glaciación, hace 9,000 años cuando el nivel del mar llegó a niveles de hasta 120 m menos respecto al nivel actual.

Respecto a los vestigios arqueológicos, al descender el nivel de agua de cuevas y cenotes en la región, los antiguos pobladores de la región entraban a hacer ceremonias y dejar ofrendas. Una práctica común en el pensamiento mesoamericano era depositar a los muertos en las cuevas, donde se creía que había dos formas de entrar al inframundo: las cuevas y las superficies acuosas.

La sacralidad de las cuevas y cenotes para la cultura maya está extensamente documentada, pudiendo afirmarse que la fuerza sagrada que sustenta a la caverna entre los mayas y otros pueblos originarios de Mesoamérica es la religión. La caverna como sitio sagrado es receptora de la deidad en múltiples formas y advocaciones, se identifican más de 250 atribuciones teológicas que relacionan a la cueva con la religión, el mito y el ritual.

El culto prehispánico y las cavernas se vinculan en el concepto del inframundo. El inframundo incorpora categorías muy complejas de la lógica religiosa que articula a los mitos cosmogónicos y cosmológicos como el culto a los muertos, los sacrificios humanos y de animales; así también el culto a los astros horadando los techos de las cavidades para apreciar el cielo y determinar un calendario, también son oráculos para anteponerse a las fuerzas de la naturaleza. Son el espacio de la permanencia del impulso vital. Sede de las deidades ctónicas (dioses o espíritus del inframundo) y acuáticas donde se celebran los ritos de paso. Todas estas jerarquías espirituales y otras tantas definen las relaciones ideales entre los hombres y los dioses que permiten la supervivencia de la sociedad a través de las cavernas que en la zona maya son los cenotes y sus sistemas kársticos asociados.

El ritual realizado en cavernas permite a la comunidad momentos de unión y polarización psicológica, hace que cada individuo se sienta lleno de una fuerza colectiva que habitualmente no percibe, pero que encuentra en los sitios más oscuros, recónditos, secretos e inaccesibles que promueven la excitación. Es así como la cueva activa las emociones y las dirige a la categoría afectiva con lo sobrenatural. Las cavernas para este objetivo se modifican con pisos, plataformas, muros, estrechamientos, fuentes de agua, pinturas y petroglifos. Son evidentes los rituales: de paso, los iniciáticos, de bautizo (integración social), de pubertad, etiológicos, de propiciación climática, los ascéticos, los de curanderismo, de magia, de autosacrificio, de cambio de poderes civiles y religiosos, los sexuales, de matado de cerámica o renovación y los funerarios entre los más representativos. Introducirse a una cueva significaba la separación de la vida profana (Montero, 2002).

Es necesario apuntar que las cavernas no son necesariamente el mismo inframundo, pero al menos son su entrada. Entre los mixtecos y los mayas la entrada es una cueva con un juego de pelota. Como inframundo es el lugar de los muertos, o es al menos el lugar en donde inician su viaje de ultratumba, es también el tránsito obligado subterráneo de los astros, todos estos viajes no son más que un requisito para el nuevo nacimiento. Se encuentran las ambivalencias de la vida y la muerte, los dos aspectos, positivo y negativo, que hacen de la caverna un gran símbolo religioso (Montero, 1999).

El análisis geomántico vincula a la comunidad con la caverna, permitiéndole explicar la estructura del universo, y por lo tanto ofreciéndole un orden interpretativo del cosmos. Desde la cueva fue posible difundir los principales conceptos cosmológicos de la antigüedad construyendo adoratorios,





observatorios astronómicos imaginando constantes matemáticas a través del calendario, plasmando petroglifos y pinturas como instrumentos axiales del simbolismo religioso que se articularon para exaltar un espacio sagrado. Es así, como se logra concretizar un lenguaje simbólico del paisaje. Para interpretarlo se requiere de una lectura topográfica, donde la geografía es el idioma de los símbolos que establecen un orden; en donde la cueva es el *axis mundi* del universo concebido (Montero, 1999).

Las geoformas subterráneas eran deificadas por contener agua. Entre los mayas con Chaac, en Oaxaca con Cocijo, y en el Altiplano con Tlaloc, el culto acuático representa la más importante veneración practicada a las cuevas. El principal motivo de las visitas fue pedir a los dioses de la lluvia que ahí habitan, la cantidad necesaria para irrigar los campos agrícolas. La cueva ha sido utilizada como un instrumento psicoterapéutico desde la antigüedad. Aunque con la evangelización durante la Colonia el culto a las cuevas paso a un plano de superstición, magia, cultos demoniacos e idolatría. La cueva se convirtió entonces en un reducto para esa ideología subalterna que era sancionada por las estructuras del poder eclesiástico y secular. Sin embargo, esta función perdura hasta la actualidad en algunos grupos (Montero, 1999).

Con la declaratoria del APFF Cenote Aerolito se coadyuvará y promoverá la investigación, protección, conservación, restauración y recuperación de los restos arqueológicos y paleontológicos registrados en su sistema de cuevas inundadas, que son parte del patrimonio cultural de la Nación, ya que conforme al artículo 45, fracción VII, de la LGEEPA, uno de los objetivos del establecimiento de ANP de carácter federal es *“proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas”*.

B) ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS RELEVANTES DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL

Si bien al interior de la propuesta de APFF Cenote Aerolito no existen asentamientos humanos, la cabecera municipal de San Miguel de Cozumel se encuentra a tan solo 5 km. Esta es la localidad más poblada de la isla con el 95.36% de la población total del municipio. Dada su cercanía e influencia directa sobre la eventual ANP, los análisis socioeconómicos se realizaron con base en la información de esta localidad como una aproximación de los valores socioeconómicos de influencia en la zona de interés (INEGI, 2021).

Población

El estado de Quintana Roo cuenta con 1,857,985 habitantes que representan el 1.47% de la población total del país. En la composición por género existe una distribución muy equilibrada de 50.42% hombres y 49.58% mujeres, es decir una relación de 1.01 hombres por cada mujer. A nivel local el municipio de Cozumel cuenta con 84,519 habitantes, de los cuales 49.96% son hombres y 50.04% mujeres, mostrando una relación de 99 hombres por cada 100 mujeres (INEGI, 2016; 2021).

Respecto a la composición por edades en Cozumel, se observa una concentración en el segmento adulto de la población (25 a 39 años) y una tasa de natalidad cercana al 4% para ambos sexos. Cabe resaltar que el segmento de la población de más de 70 años es el más reducido, con lo cual la relación de dependencia es baja (INEGI, 2021) (Figura 50).



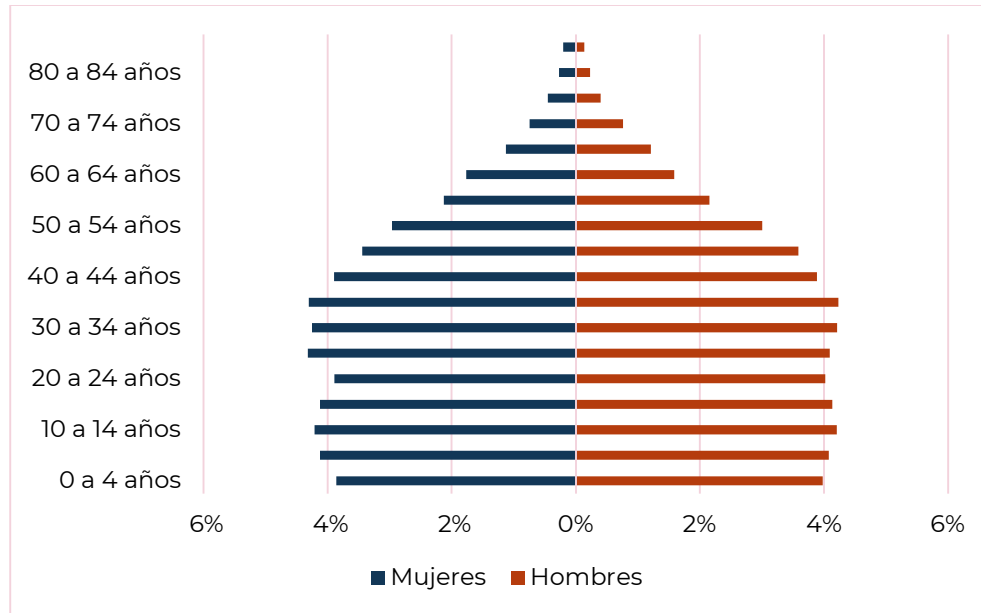


Figura 50. Pirámide poblacional por edades de los habitantes del municipio de Cozumel, Quintana Roo.
Fuente: INEGI (2021).

Índice de rezago social y marginación

Con el fin de realizar una medición multidimensional de la pobreza, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) elaboró el Índice de Rezago Social, incorporando indicadores de educación, acceso a servicios de salud, servicios básicos, calidad y espacios en la vivienda y activos en el hogar, permitiendo observar el grado de rezago social a partir de la medida ponderada de cuatro indicadores de carencias sociales. Para la localidad de San Miguel de Cozumel, el Coneval lo clasifica con un grado de rezago social muy bajo, ocupando el lugar 103,448 a nivel nacional (CONEVAL, 2019; 2021).

Por su parte, según estimaciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO), el 69.54% de la población de Cozumel percibe ingresos menores a 2 salarios mínimos, mientras que un 31.78% habita en viviendas particulares con hacinamiento y 0.46% reportan no tener agua entubada en sus viviendas particulares. En síntesis, en este municipio localidad se registra un grado de marginación muy bajo que lo sitúa en el lugar 2,276 a nivel nacional (CONAPO, 2020).

Pueblos y comunidades indígenas y afroamericanas

Al interior de la propuesta de APFF Cenote El Aerolito no se encuentra ningún asentamiento humano. En lo que respecta a los pueblos y comunidades indígenas y afroamericanas, en la cabecera municipal de San Miguel de Cozumel habitan 6,074 personas que declararon hablar alguna lengua indígena, lo que corresponde al 7.19% de la población total de la localidad. Sin embargo, a nivel municipal se encuentran localidades como Nueva Esperanza, Los Pinos, El Cedral y Pueblo Nuevo cuya proporción de personas hablantes de lenguas indígenas se encuentra entre el 18% y el 40% (INEGI, 2021).

Por su parte, de acuerdo con el Catálogo de localidades A y B, 2020 de la Secretaría de Bienestar, sólo las localidades con población indígena mayor o igual a 40% de su población total pueden clasificarse





como localidad indígena (categoría A) y aquellas con menos del 40% de población indígena y más de 150 indígenas entre su población total acceden a la categoría B de localidad de interés (Bienestar, 2019).

En este sentido, en el municipio de Cozumel se registran 50 localidades indígenas, de las cuales 42 son tipo A y ocho corresponden a localidades tipo B.

Escolaridad

A nivel municipal en Cozumel existe un grado promedio de escolaridad de 10.22 años, mientras que un 2.57% de la población de 15 años y más es analfabeta y 3.20% no tiene escolaridad. Asimismo, 50.46% de la población de 18 años tiene algún grado de educación posbásica aprobado (INEGI, 2021) (Tabla 9).

Tabla 9. Escolaridad de los habitantes del municipio de Cozumel, Quintana Roo. Fuente: INEGI, 2021.

15 años y más					18 años y más
Sin escolaridad	Primaria incompleta	Primaria completa	Secundaria incompleta	Secundaria completa	Educación posbásica
3.20%	5.41%	9.85%	2.22%	28.52%	50.46%

Ocupación y empleo

La Población Económicamente Activa (PEA) se encuentra integrada por todas las personas de 12 y más años que realizaron algún tipo de actividad económica (población ocupada), o que buscaron activamente hacerlo (población desocupada abierta), en los dos meses previos a la semana de levantamiento de información para el Censo de Población y Vivienda 2020 por parte del INEGI (INEGI, 2021).

En el municipio de Cozumel, la PEA se conforma mayoritariamente por hombres con un 58.06% del total. Asimismo, se registra una tasa de ocupación del 98.33%, sin detectarse diferencias significativas entre ambos géneros (INEGI, 2021) (Figura 51).

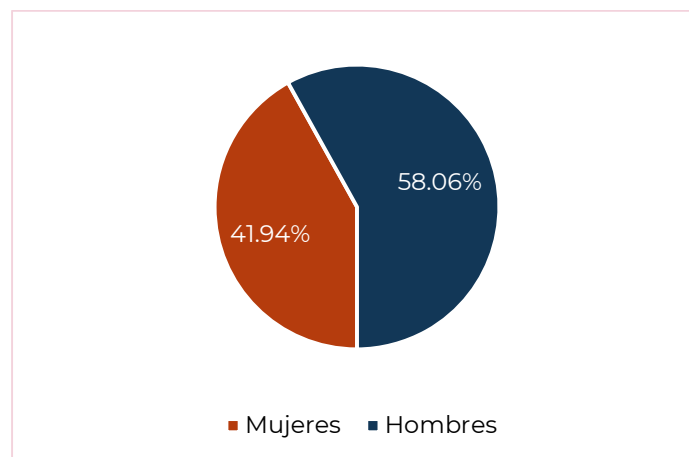


Figura 51. Población económicamente activa por género en el municipio de Cozumel, Quintana Roo. Fuente: INEGI (2021).



En lo que respecta a la población económicamente no activa, la gran mayoría se encuentran en esta condición por dedicarse a estudiar o al trabajo doméstico. Sólo un 2.2% son económicamente no activos debido a alguna limitación física o mental que les impide trabajar (INEGI, 2021) (Figura 52).

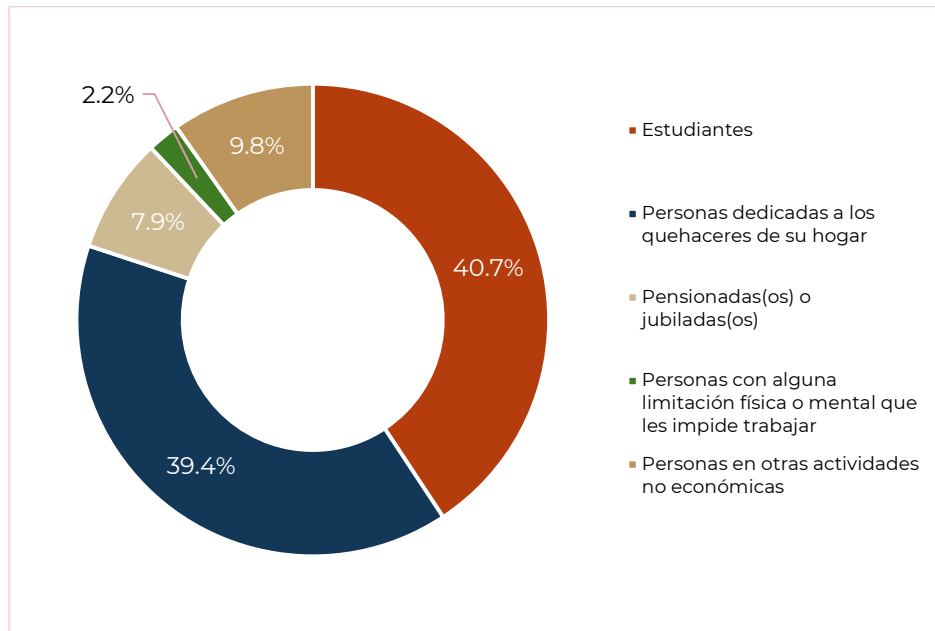


Figura 52. Población no económicamente activa en el municipio de Cozumel, Quintana Roo. Fuente: INEGI, 2021.

Unidades económicas

De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), en el municipio de Cozumel se ubican 5,310 unidades económicas, de las cuales aproximadamente un 50% se dedican a comercio al por menor. Le siguen por orden de importancia las unidades dedicadas a servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (978 unidades) y otros servicios, excepto actividades gubernamentales (711 unidades). Ello da cuenta de la relevancia del turismo y del sector servicios en el municipio de interés (INEGI, 2022b) (Tabla 10).

Tabla 10. Unidades económicas en el municipio de Cozumel, Quintana Roo. Fuente: Fuente: INEGI, 2022b.

Actividad	Número de unidades
Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza	4
Minería	3
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final	7
Construcción	19
Industrias manufactureras	252
Comercio al por mayor	70
Comercio al por menor	2,113
Transportes, correos y almacenamiento	42
Información en medios masivos	21
Servicios financieros y de seguros	165
Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	152
Servicios profesionales, científicos y técnicos	107



Actividad	Número de unidades
Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	97
Servicios educativos	116
Servicios de salud y de asistencia social	207
Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	178
Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	978
Otros servicios excepto actividades gubernamentales	711
Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales	68
Total	5,310

Salud

En lo que respecta a servicios de salud la mayoría de la población del municipio de Cozumel se encuentra afiliada al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) o al Instituto de Salud para el Bienestar (INSABI). Es de resaltar que, si bien una quinta parte de la población de Cozumel se encuentra sin afiliación alguna a servicios de salud, esta proporción es menor que la registrada a nivel estatal donde alcanza una cuarta parte del total de la población (INEGI, 2021) (Tabla 11).

Tabla 11. Afiliación a servicios de salud de la población del estado de Quintana Roo y del municipio de Cozumel. Fuente: INEGI (2021).

Lugar	Sin afiliación	IMSS	INSABI	ISSSTE o ISSSTE Estatal	IMSS BIENESTAR	Pemex, Defensa o Marina	Institución privada	Otra institución
Quintana Roo	26.5%	60.6%	28.1%	8.2%	0.5%	0.8%	2.5%	0.6%
Cozumel	21.9%	54.7%	21.1%	10.1%	0.2%	1.9%	2.8%	0.1%

Producto Interno Bruto

El Producto Interno Bruto (PIB) es el valor monetario de los bienes y servicios finales producidos por una economía en un periodo determinado. La participación porcentual del PIB de Quintana Roo en el PIB nacional mostró una tendencia al alza en el periodo 2003-2019, con una leve caída en 2009 a raíz de la crisis financiera que se presentó ese año. Sin embargo, a partir de 2019 su participación comenzó a caer al pasar de 1.57% a 1.31% en 2020. Una posible explicación radica en los efectos negativos de la pandemia por COVID-19 y las afectaciones, sobre todo, al sector servicios, el cual representa la mayor parte del PIB estatal. Hacia 2021 su participación repuntó, aunque sin alcanzar los niveles previos a 2019 (INEGI, 2022b) (Figura 53).





Figura 53. Participación porcentual del PIB de Quintana Roo en el PIB nacional. Fuente: INEGI (2022b).

Las actividades terciarias son el componente principal del PIB estatal de Quintana Roo abarcando, en promedio, un 85% del PIB total del estado. Dentro de este sector, las actividades de servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (19.27% del PIB estatal), servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles (16.05% del PIB estatal) y comercio al por menor (14.14%) son las de mayor relevancia. Cabe resaltar que en 2016 hubo un incremento de la participación de las actividades secundarias a raíz de un impulso que recibieron las actividades de construcción, pues pasaron de contribuir con un 7.73% del PIB estatal en 2015 a un 9.54% en 2016 (INEGI, 2022b) (Figura 54).

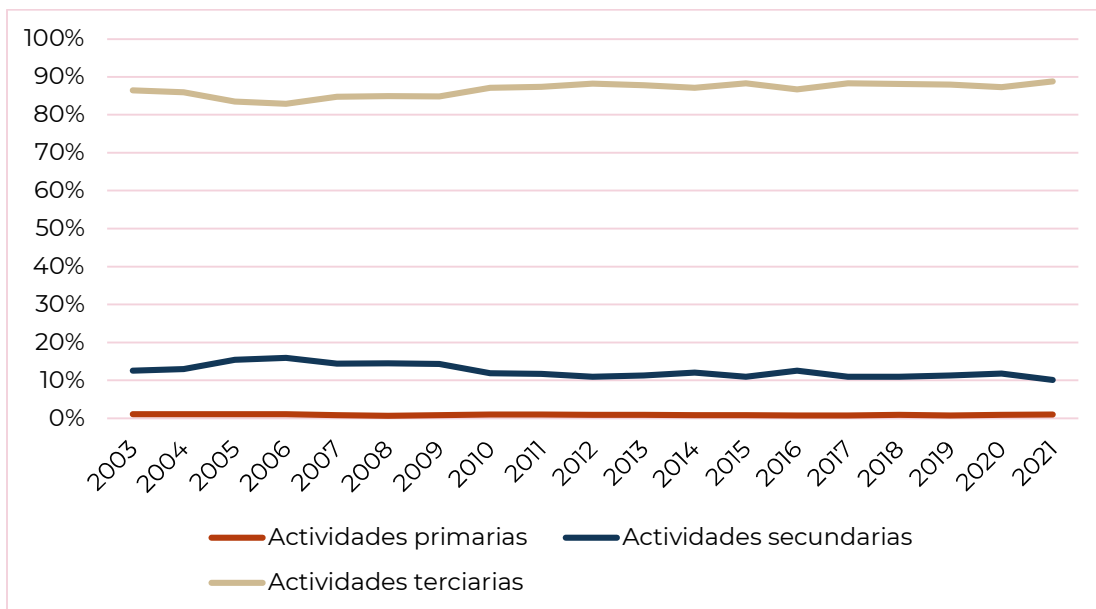


Figura 54. Composición del PIB de Quintana Roo por tipo de actividad económica. Fuente: INEGI (2022b).





Turismo

La actividad económica más importante para el estado de Quintana Roo es el turismo. Al mismo tiempo es la que más amenazas ha generado para la conservación de su biodiversidad, debido a diversos factores asociados al cambio de uso de suelo para la construcción de infraestructura hotelera y desarrollos urbanos aledaños a los centros turísticos (Calmé *et al.*, 2011).

La económica alrededor de las actividades turísticas y servicios directos e indirectos asociados en Quintana Roo es tan relevante, que el aporte del PIB turístico en el PIB total estatal representa el 34.5%, el valor más alto en todo el país. La derrama económica directa por turismo en Quintana Roo entre junio de 2021 y junio de 2022 alcanzó alrededor de 1 billón de pesos (GQROO, 2022; DATATUR, 2023).

Respecto a la afluencia turística, en el estado de Quintana Roo se registró un total de 19 millones 749 mil visitantes que corresponden a 15 millones 929 mil turistas, 3 millones 647 mil cruceristas y 171 mil 777 que ingresaron por la frontera entre México y Belice (GQROO, 2022).

De igual forma, por su estructura productiva, actualmente el municipio de Cozumel basa su desarrollo económico estrictamente en el turismo, por lo que cuenta con la infraestructura necesaria para la prestación de diversos servicios, así como el uso de espacios propios y modificados para la práctica turística-recreativa, llegando a ser el primer destino en el mundo en la recepción de cruceros, generando una importante derrama económica. Aquellas actividades que no son propiamente turísticas en alguna medida están condicionadas por esa actividad (INE-SEMARNAP, 1998; Palafox-Muñoz *et al.*, 2017; GQROO, 2022).

En cuanto a la infraestructura hotelera, el municipio de Cozumel cuenta hasta ahora con 66 centros de hospedaje, que representan el 5.04%% de la oferta de hospedaje en la entidad, los cuales disponen de 4,701 cuartos, que constituyen el 3.77% del total de estatal (GQROO, 2022) (Tabla 12).

Tabla 12. Oferta de hospedaje de junio 2021 a junio 2022 en Cozumel, Quintana Roo. Fuente: GQROO (2022).

Municipios	Centros de hospedaje	Habitaciones
Bacalar	128	1,239
Benito Juárez	201	42,245
Cozumel	66	4,701
Felipe Carrillo Puerto	12	186
Isla Mujeres	66	9,343
José María Morelos	9	119
Lázaro Cárdenas	118	1,762
Othón P. Blanco	125	2,822
Puerto Morelos	67	7,057
Solidaridad	287	44,121
Tulum	229	10,868
Total	1,308	124,463





En lo que respecta a la afluencia turística, entre julio de 2021 y junio de 2022 arribaron a Cozumel 4 millones 169 mil 687 turistas (5.58% del total de la entidad), lo que lo posicionó como el cuarto destino turístico de mayor relevancia en la entidad detrás de la Riviera Maya, Cancún e Isla Mujeres (Tabla 13). Además, el destino turístico de Cozumel documenta una ocupación hotelera del 64.1%, la cuarta más elevada de la entidad (GQROO, 2022).

Tabla 13. Llegada de turistas por centro turístico en Quintana Roo de julio 2021 a junio 2022.
Fuente: GQROO (2022).

Centro turístico	Visitantes	Participación porcentual
Riviera Maya	32,622,891	43.68%
Cancún	30,839,016	41.29%
Isla Mujeres	4,281,215	5.73%
Cozumel	4,169,687	5.58%
Chetumal	2,781,250	3.72%
Total	74,694,059	100%

Como se mencionó, el arribo de cruceros es una de las vías de ingreso de turistas a la isla más importantes, siendo Cozumel el principal destino de la entidad, reportando un total de 5,537 cruceros que arribaron con 19 millones 496 mil 831 cruceristas a bordo de julio a 2021 a junio de 2022. Esto representó casi tres cuartas partes de la actividad crucera de Quintana Roo (GQROO, 2022) (Tabla 14).

Tabla 14. Arribo de cruceristas y cruceros por destino en Quintana Roo de julio 2021 a junio 2022.
Fuente: GQROO (2022).

Destino	Cruceristas	Cruceros	Participación porcentual en cruceristas	Participación porcentual en cruceros
Cozumel	19,496,831	5,537	72.30%	74.83%
Costa Maya	7,471,555	1,862	27.70%	25.17%
Total	26,968,386	7,399	100.00%	100%

Finalmente, en el centro turístico de Cozumel se generó una derrama económica por turismo de 106 mil 264 millones 710 mil pesos, que representó el 7.75% de los ingresos percibidos por esta actividad en la entidad, posicionándose como el tercer lugar turístico de mayor relevancia para Quintana Roo (GQROO, 2022) (Tabla 15).

Tabla 15. Derrama económica por centro turístico, julio 2021-junio 2022. Fuente: GQROO (2022).

Lugar	Millones de pesos*	Participación porcentual
Riviera Maya	622,927.06	45.45%
Cancún	558,240.25	40.73%
Cozumel	106,264.71	7.75%
Isla Mujeres	73,043.25	5.33%
Chetumal	10,202.81	0.74%
Total	1,370,678.08	100%

*Los datos reportados por el Gobierno del Estado de Quintana Roo se presentan en millones de dólares. Para realizar la conversión, se tomó el promedio del tipo de cambio FIX del primero de junio de 2021 al 31 de julio de 2022, el cual fue de \$20.33 pesos.





C) USOS Y APROVECHAMIENTOS, ACTUALES Y POTENCIALES DE LOS RECURSOS NATURALES

Desde la década de los cincuenta Cozumel cambió su vocación agrícola por los servicios, específicamente por los del ramo turístico motivado por el reconocimiento de la belleza paisajística y la biodiversidad que caracteriza a los diversos ecosistemas de la isla, aunado a sus manifestaciones culturales que coadyuvan en la oferta de atractivos. Esto ha generado un desarrollo económico y social basado casi en su totalidad en el turismo (Palafox-Muñoz *et al.*, 2017).

Sin embargo, este modelo de desarrollo, con la migración y urbanización asociada, ha dado pauta a que las actividades turísticas tengan una fuerte tendencia hacia su masificación, que, si bien es capaz de generar capitales importantes, resulta en impactos y afectaciones a los ecosistemas y a su biodiversidad (Segrado *et al.*, 2008).

Así, con el objeto de reconocer la importancia económica de los recursos naturales asociados a la propuesta de APFF Cenote Aerolito, se analizaron los principales usos que le da la población del municipio de Cozumel a sus recursos naturales. En este sentido, algunos indicadores, particularmente los asociados a la visitación y turismo de naturaleza tienen como referencia la visitación y actividades turísticas en las dos ANP federales decretadas en el municipio, el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y el Área de Protección de Flora y Fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel.

C.1) Usos actuales

Agricultura

De acuerdo con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el estado de Quintana Roo, existe un total de 111,642 ha sembradas y 110,287 ha cosechadas, lo que generó un valor de producción de 3 mil 325 millones 894 mil 10 pesos, para el año agrícola 2021. Sin embargo, en el municipio de Cozumel no se identifican actividades agrícolas a considerar (INE-SEMARNAP, 1998; SIAP, 2023a).

Ganadería

En lo que respecta a la actividad ganadera, el valor de la producción de carne en canal en el estado de Quintana Roo representa alrededor de 893 millones 786 mil 890 pesos, de los cuales el municipio de Cozumel aporta 451 mil 745 pesos, esto es, el 0.05% de la producción de carne en canal de la entidad, que en el contexto estatal no resulta significativa. La reducida actividad pecuaria la llevan a cabo pocas personas y se basa en la cría y explotación de ganado (bovino fundamentalmente). Aun así, los productos bovinos son los de mayor relevancia para Cozumel, pues aportan el 76% de la producción de carne en canal del municipio. Cabe destacar que se registraron 55 cabezas de ganado sacrificadas, las cuales correspondieron a ganado ovino (INE-SEMARNAP, 1998; SIAP, 2023b) (Tabla 16).



Tabla 16. Volumen y valor de la producción de carne en canal en el municipio de Cozumel, Quintana Roo.

Producto/Especie	Producción (toneladas)	Precio (pesos por kg)	Valor de la Producción (miles de pesos)	Animales sacrificados (cabezas)	Peso (kg)
Bovino	5.001	68.72	343.658	-	227.318
Porcino	-	-	-	-	-
Ovino	1.065	101.49	108.087	55	19.364
Caprino	-	-	-	-	-
Ave	-	-	-	-	-
Guajolote	-	-	-	-	-
Total	6.066	.	451.745	55	-

Otros productos de origen animal

En cuanto a la actividad de pesca, la desarrollada en el municipio no representa un lugar significativo para el estado, ya que su peso vivo en términos comparativos refleja alrededor del 4%. Por otro lado, en la isla de Cozumel no se reporta producción apícola, de leche, huevo, cera o lana (INE-SEMARNAP, 1998; SIAP, 2023b).

Turismo

Como se mencionó anteriormente, Cozumel cuenta con diversos ecosistemas de gran belleza y una ubicación privilegiada en el Caribe Mexicano, presentando condiciones sumamente favorables para el desarrollo de la actividad turística, la cual se manifiesta con el gran afluente de cruceros turísticos a nivel mundial que arriban a la isla (Segrado *et al.*, 2008; GQROO, 2022).

La isla tiene una temporalidad turística fuertemente marcada, con valores más altos de visitantes entre diciembre y abril y bajos el resto del año. Los meses con mayor visitación son los de invierno (enero-marzo) y el más bajo es septiembre, dada la presencia de frecuentes huracanes o tormentas tropicales y lluvias (CONANP-GIZ, 2017).

En 2017 a través del Programa Permanente de Monitoreo de Uso Público (MUP), se registró una afluencia al Parque Nacional Arrecifes de Cozumel de 962,140 personas; mientras que en 2018 fueron 1,073,308 visitantes, considerando cuatro horas de actividad por día (por visitante). Estas altas afluencias de turismo masivo han provocado una fuerte presión en los ecosistemas submarinos, aumentando los impactos directos al arrecife y a la vida marina, lo cual se refleja en la pérdida de cobertura coralina y en cambios en la estructura y composición de las especies arrecifales. Esta saturación ocasiona que su atractivo, la calidad y los servicios ambientales que provee el ecosistema disminuyan (CONANP-GIZ, 2017; PNAC, 2019).

Dentro de los visitantes que arriban a Cozumel, se encuentra un segmento de turismo muy especializado, el de las actividades subacuáticas. Por sus muy particulares condiciones desde hace 50 años, el mar que rodea la isla es uno de los puntos más concurridos por buzos de todo el mundo, aficionados a la observación de ambientes submarinos, incluyendo todas las modalidades de buceo (recreativo, técnico, comercial y deportivo) (CONANP-SEMARNAT, 2016).





En este sentido, alrededor del 80 % de la actividad turística y recreativa de buceo y esnórquel de todos los visitantes en la isla, se concentra en este parque nacional. Se estima que diariamente (dependiendo de la temporada) alrededor de 1,500 buzos visitan el área, en donde efectúan de una a dos inmersiones por día. Los arrecifes Paraíso, Paso del Cedral, Chankana'ab y Palancar son los más visitados y por ende afectados, además que son los que durante más tiempo han recibido una alta carga de visitantes (INE-SEMARNAP, 1998; CONANP-SEMARNAT, 2016).

Por otro lado, en el Área de Protección de Flora y Fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel, las principales actividades turísticas que se desarrollan son snorkel, buceo, recorridos en embarcaciones no motorizadas como el velerismo, kayakismo, canoismo, paddling, kiting, kitesurf, boarding, wind surfing y surfing; en tierra, senderismo interpretativo, fotografía de naturaleza, recorridos turísticos en vehículos terrestres y la observación de avifauna. En lo que respecta al buceo, esta actividad es realizada solo por buzos avanzados debido a la dificultad que implican las condiciones ambientales del sitio, por lo cual la visitación es reducida. Además, se identifica que los principales usuarios del ANP son pescadores, prestadores de servicios turísticos, concesionarios de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT), vendedores de artesanías y restauranteros (CONANP-SEMARNAT, 2016).

En el ámbito social, la conservación de esta ANP significa que cooperativas pesqueras, pescadores independientes, artesanos, cooperativas turísticas, prestadores de servicios náutico-recreativos y pobladores en general conserven sus medios de subsistencia, recreación y calidad de vida (CONANP-SEMARNAT, 2016).

C.2) Usos potenciales

Como se mencionó, los ecosistemas subacuáticos de Cozumel son de los sitios más visitados del mundo por buzos que practican las diferentes modalidades de buceo, lo que ha generado impactos negativos. En particular, el cenote El Aerolito tiene una baja visitación y es principalmente de pobladores locales. Dentro del sistema de cavernas inundadas se llevan a cabo actividades de espeleobuceo enfocadas a la exploración de sus ramificaciones y al registro y monitoreo de su biodiversidad, con una actividad de entre 9-16 buzos que ingresan mensualmente (Calderón-Gutiérrez, 2013).

Algunos análisis del nivel de aceptación de visitantes a cenotes, tomando como ejemplo el cenote X'batún en Yucatán, permiten hacer una aproximación de la capacidad de carga turística en estos ecosistemas. Concretamente, se estima que el nivel de aceptación para cualquier tipo de visitante (local, nacional e internacional) decrece conforme aumenta el número de personas en el lugar a partir de cierto límite. En otras palabras, el número máximo aceptado de personas al mismo tiempo que un visitante local está dispuesto a tolerar antes de que su satisfacción comience a decrecer es de 40, mientras que en los nacionales es 35 y en los internacionales es de 27 (Fraustro, 2019).

Considerando al segmento turístico enfocado en la apreciación y disfrute de los elementos naturales de la isla (marinos y terrestres), y con base en la afluencia y actividades de turismo de naturaleza que se desarrollan en las dos ANP de carácter federal en Cozumel, es posible que la propuesta de APFF Cenote Aerolito, se inserte en la dinámica turística de la isla, particularmente dentro del segmento de buceo técnico y científico (espeleobuceo), mismo que se ha visto potenciado por los atributos





ecosistémicos de varios cenotes y sus sistemas de cuevas inundadas asociadas. En este sentido, la implementación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito generaría un efecto de red¹ que impulsaría la demanda agregada de servicios turísticos y, concretamente, la realización de actividades de espeleobuceo.

Conforme a lo anterior, es necesario regular la visitación y acceso al cenote El Aerolito, así como establecer las reglas de operación, capacidad de carga del cenote, actividades permitidas y prohibidas, códigos de conducta y equipos de buceo autónomo permitidos, entre otros aspectos, en el eventual programa de manejo. Esto con el objetivo de proteger y preservar la integridad de este ecosistema único en el mundo.

C.3) Usos tradicionales

Particularmente, para la propuesta de APFF Cenote Aerolito no existen datos oficiales sobre el número de personas que lo visitan, tanto para fines científicos como recreativos. En el sistema de cavernas del cenote, actualmente se practica el espeleobuceo dentro de varios proyectos de investigación, aunque es de muy bajo volumen con 9-16 buzos al mes (Calderón-Gutiérrez, 2013; Mejía-Ortíz et al., 2022).

A pesar de las señalizaciones del riesgo de nadar en el cuerpo de agua, dado la presencia de cocodrilos de río (*Crocodylus acutus*), el cenote es de libre acceso y utilizado como balneario y para fines de esparcimiento por la población local sin ningún tipo de regulación. El cenote El Aerolito es un sitio tradicional de esparcimiento y reunión en fin de semana para la población local. Aunque su visitación es a pequeña escala, esta genera la acumulación de basura y desechos en las inmediaciones del humedal (Mejía-Ortíz et al., 2022; ACOZ, 2023) (Figura 55).



Figura 55. Visitación en el cenote El Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. Este sitio es identificado como un lugar de esparcimiento y recreación por parte pobladores locales. Actualmente no existe ninguna regulación para su acceso y/o uso.

¹ Se entiende como efecto o externalidad de red al incremento en el bienestar de un agente económico ante la decisión de otro agente de ingresar y formar parte de la red (Tiróle, 1988).

En este caso, el efecto de red surge con el establecimiento del APFF Cenote Aerolito, la cual proporciona sus servicios ecosistémicos a la red de ANP en Cozumel, permitiendo que el valor de las actividades turísticas en la zona se vea potenciada al incrementar el portafolio de opciones al que tienen acceso los turistas y la conectividad entre las diferentes ANP federales y locales.





D) SITUACIÓN JURÍDICA DE LA TENENCIA DE LA TIERRA

La propiedad es pública de conformidad con la escritura pública número 15,937, de fecha 7 de agosto de 2012 pasada ante la fe del Titular de la Notaría Pública No. 13 del Estado de Quintana Roo, mediante la cual se hace constar que Nacional Financiera, Sociedad Nacional de Crédito, Institución de Banca de Desarrollo, como Fiduciaria en el Fideicomiso denominado Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR), formalizó la subdivisión del inmueble certificación de medidas, colindancias y superficie, así como la subdivisión del inmueble de su propiedad identificado como Fracción I, ubicado en la localidad y municipio de Cozumel, en el Estado de Quintana Roo, dicha escritura fue inscrita en el Registro Público de la Propiedad y de Comercio de Quintana Roo, el 14 de septiembre de 2012.

De los inmuebles objeto de la Escritura mencionada anteriormente, una superficie total de 10.199113 hectáreas corresponde a la propuesta del área natural protegida misma que equivale al 100 % de dicha área.

E) PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN QUE SE HAYAN REALIZADO O QUE SE PRETENDAN REALIZAR

Los ecosistemas anquihalinos son de los menos estudiados en el mundo dado su difícil acceso, su bibliografía es escasa y dispersa, además los estudios pocas veces especifican ubicaciones concretas. Su conocimiento se limita generalmente a la observación de un cenote, que puede ser la entrada a una pequeña cueva o parte de un amplio sistema de cuevas sumergidas, tanto de agua dulce como anquihalinas, dejando de lado el resto del sistema cavernícola (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017).

México es uno de los países más ricos en estos ecosistemas, ya que cuenta con una gran cantidad de cenotes. Tan solo en la península de Yucatán, se han registrado más de 2,000. En la isla de Cozumel se tiene registro de 18 cenotes, la mayoría cercanos a la costa, varios de ellos descubiertos recientemente (Calderón-Gutiérrez, 2013; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017).

El estudio de los componentes bióticos y abióticos de estos cenotes comenzó a finales de la década de los 30, aunque más de la mitad de los registros de su biodiversidad se han dado en los últimos 10 años. En particular, las primeras exploraciones dentro del sistema de cavernas inundadas del cenote El Aerolito, las realizaron a mediados de los 80, los especialistas en espeleobuceo Steve Ormeroid, Jeff Bozanic, Germán Yáñez-Mendoza, Wes Skiles, Dennis Williams, Tom Morris y Check Stevens (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017) (Figura 56).



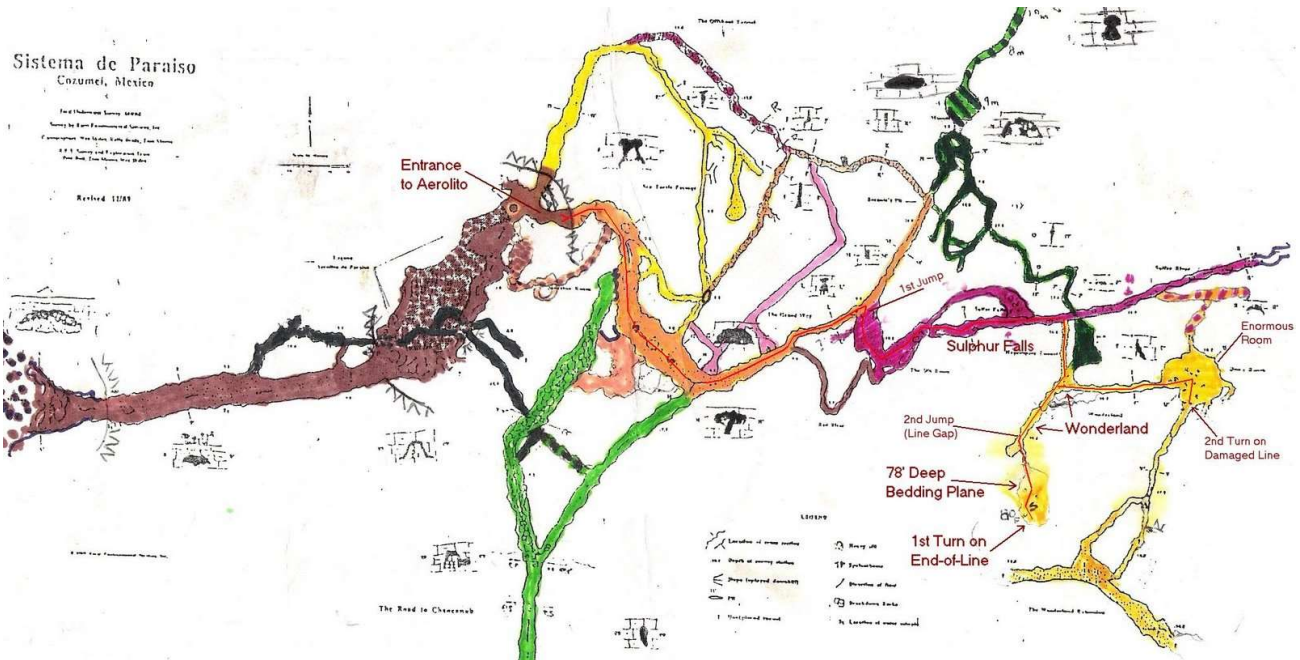


Figura 56. Mapa de 1989 del sistema de cavernas inundadas de El Aerolito donde se aprecia la extensión del sistema explorado desde mediados de los 80 hasta ese momento.

Desde entonces se han desarrollado diversos proyectos de exploración científica enfocados en conocer y mapear los pasajes y ramificaciones de este singular ecosistema cavernícola, sus dimensiones y dirección, así como el registro de su riqueza biológica y parámetros fisicoquímicos que ayuden al entendimiento de sus complejos ciclos y ensamblajes ecológicos (Figura 57, Figura 58 y Figura 59) (Tabla 17) (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017; Ruíz-Cancino *et al.* 2019).



Figura 57. Investigadores expertos en espeleobuceo preparándose para sumergirse en el sistema cavernario de El Aerolito en Cozumel. Gracias a los diferentes proyectos que han llevado a cabo diversas instituciones académicas y de exploración se han descubierto especies desconocidas para la ciencia, únicas en el mundo y que solo habitan en la propuesta de ANP.



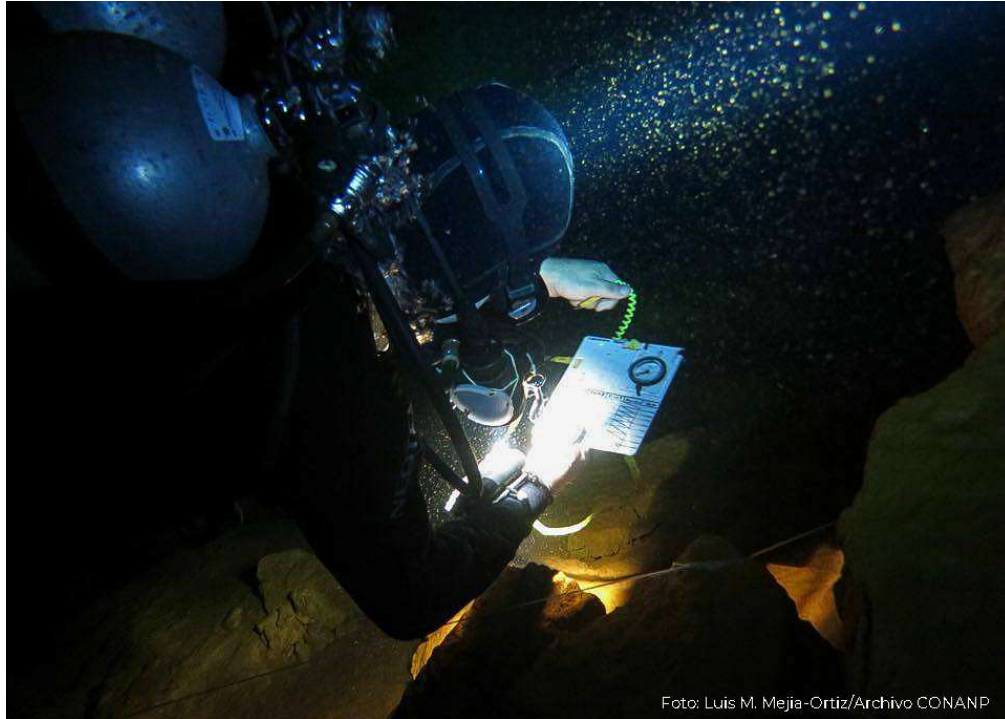


Foto: Luis M. Mejía-Ortiz/Archivo CONANP

Figura 58. Espeleobuzo llevando a cabo registros de rumbo y profundidad de uno de los pasajes de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.

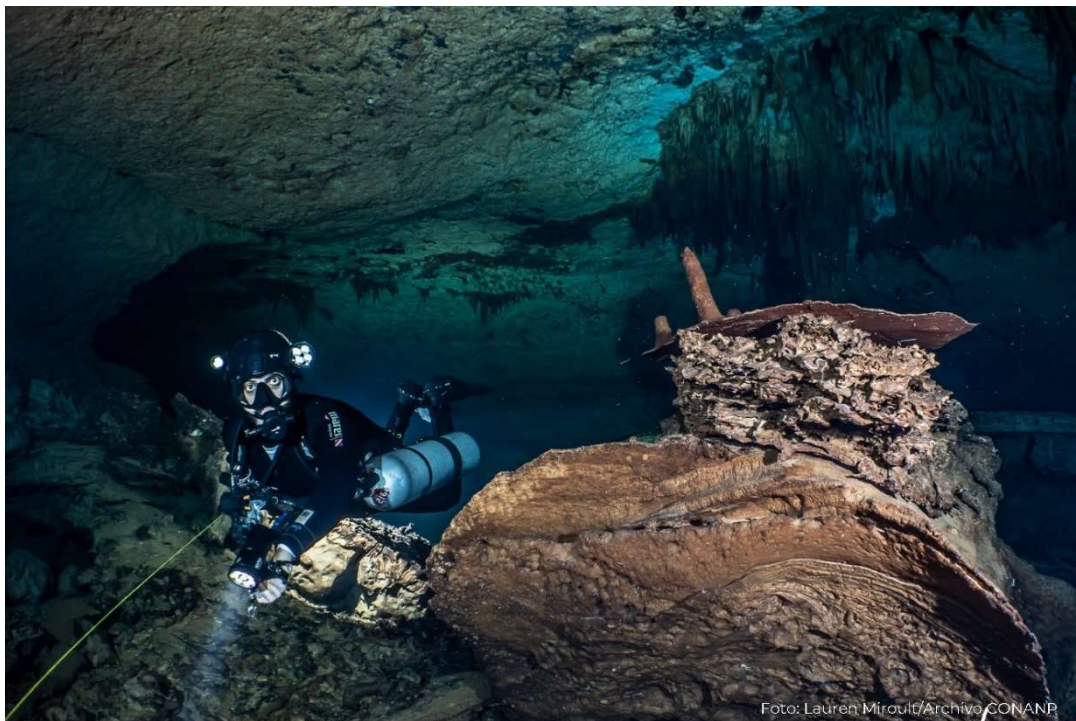


Foto: Lauren Miroult/Archivo CONANP

Figura 59. Espeleobuzo recorriendo uno de los diversos pasajes del cenote El Aerolito. Se aprecian las diversas estructuras geológicas, como las estalactitas y estalagmitas, del sistema.



Asimismo, en la parte terrestre, en la entrada al cenote El Aerolito, se han realizado investigaciones sobre la disponibilidad de recursos y uso de hábitat en las asociaciones vegetales aledañas por parte de grupos de polinizadores y dispersores de semillas claves en el funcionamiento del ecosistema, como colibríes y murciélagos (Figura 60) (Tabla 17) (Mendoza, 2011; Rincón, 2013; Morales-Contreras et al. 2020).



Foto: Martha Rincón Sandoval

Figura 60. Muestreo de murciélagos para determinar el uso de hábitat y recursos en el cenote El Aerolito en Cozumel.

Estos proyectos se han realizado con la participación conjunta de científicos y exploradores especialistas en estos sistemas, provenientes de instituciones académicas de la Península de Yucatán, universidades y centros de investigación nacionales y del extranjero y asociaciones civiles (Ruíz-Cancino et al. 2019), como:

- Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UQroo) Campus Cozumel.
- Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT).
- Círculo Espeleológico del Mayab A. C.
- Instituto de Biología (IB), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Facultad de Ciencias (FC), UNAM.
- Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), UNAM.
- Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS).
- Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).
- Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).
- Texas A&M University, EUA.
- Harvard University, EUA.
- Northwestern University, EUA.
- American University, EUA.
- George Washington University, EUA.
- Smithsonian Institution, EUA.





- Cornell University, EUA.
- Woods Hole Oceanographic Institution, EUA.
- Karst Research Institute, Eslovenia.

Los sistemas subterráneos son excelentes laboratorios naturales para entender los procesos de adaptación y especiación de distintos organismos, por lo que actualmente varios proyectos continúan en desarrollo en el cenote, siendo notable la información que se ha logrado obtener tanto del sistema abierto o como de la cueva y su sistema subterráneo, así como de sus relaciones con el medio exterior de la selva y manglar o bien del arrecife circundante (Ruíz-Cancino *et al.*, 2019). En estos momentos el sistema se encuentra monitoreado en variables como temperatura y oxígeno disuelto de manera permanente con registros de cada hora a lo largo del tiempo.

Tabla 17. Principales estudios e investigaciones realizadas en la propuesta de APFF Cenote Aerolito y su área circundante, en Cozumel, Quintana Roo de 1988 a 2022.

No	Institución	Título	Autor(es)	Año	Resultados
1	National Museum of Natural History Smithsonian Institution	New species and records of cave shrimps from the Yucatan Peninsula (Decapoda: Agostocaridae and Hippolytidae).	Kensley, B.	1988	Se describe al camarón chasqueador (<i>Yagerocaris Cozumel</i>), especie endémica de la isla.
2	UQRoo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	Fauna of five anchialine caves in Cozumel Island, México.	Mejía-Ortíz, L. M., G. Yañez-Mendoza y M. López-Mejía.	2006	Primera lista de crustáceos para el cenote El Aerolito.
3	UQRoo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	Echinoderms in an anchialine cave in Mexico.	Mejía-Ortíz L. M., G. Yañez-Mendoza y M. López-Mejía.	2007	Primeros registros de equinodermos en cuevas anquihalinas, dos de ellos exclusivos del cenote El Aerolito.
4	UAEQRoo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab/ICMyL-UNAM	Cenotes from Cozumel Island, Quintana Roo, México.	Mejía-Ortíz, L. M., G. Yañez-Mendoza, M. López-Mejía y Zarza E.	2007	Se describen las condiciones ambientales de los cenotes de Cozumel, incluyendo al Aerolito.
5	UAEQRoo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab/ICMyL-UNAM	Sistemas anquihalinos. <i>En:</i> Mejía-Ortíz L. M. (Ed.) 2007. Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel.	Yañez-Mendoza, G., E. Zarza-González y L. M. Mejía-Ortíz.	2007	Se desarrolló la cartografía y mapas base de los sistemas cavernícolas conocidos en la isla de Cozumel.
6	UAEQRoo-Cozumel	Crustáceos decápodos. <i>En:</i> Mejía-Ortíz L. M. (Ed.) 2007. Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel.	Mejía-Ortíz, L. M., M. López-Mejía y A. V. Muñoz-Gómez.	2007	Lista de crustáceos en la isla incluyendo al sistema cavernícola de El Aerolito.





No	Institución	Título	Autor(es)	Año	Resultados
7	ICMyL-UNAM/ UQRoo-Cozumel /Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	Echinoderms fauna of anchialine caves in Cozumel Island, Mexico.	Solís-Marín, F. A., A. Laguarda-Figueras, F. Vázquez-Gutiérrez, L. M. Mejía-Ortíz y G. Yañez-Mendoza.	2010	Lista de equinodermos adaptados a los sistemas cavernícolas inundados de Cozumel.
8	ICMyL-UNAM	A new species of starfish (Echinodermata: Asteroidea) from an anchialine cave in the Mexican Caribbean.	Solís-Marín, F. A. y Laguarda-Figueras, A.	2010	Descripción de la estrella de mar (<i>Copidaste cavernícola</i>), primer equinodermo exclusivo de ambientes anquihalinos.
9	FC-UNAM	Variabilidad y estructura genética del murciélago zapotero <i>Artibeus jamaicensis</i> en tres tipos de vegetación de la isla Cozumel.	Mendoza, M. A.	2011	Estructura genética de <i>Artibeus jamaicensis</i> en tres tipos de vegetación incluyendo el cenote El Aerolito.
10	UABCS	Ecological base line establishment in the El Aerolito Anchialine System.	Calderón-Gutiérrez F. y C. A. Sánchez-Ortíz.	2012	Primer análisis de la composición ecológica del cenote El Aerolito.
11	UABCS/ICMyL-UNAM	The Aerolito de Paraiso-Anchialine System: Paradise for Echinoderms.	Calderón-Gutiérrez, F. G. Bribiesca-Contreras y F. A., Solís-Marín.	2012	Se presenta la riqueza de equinodermos en el sistema cavernícola de El Aerolito.
12	UQRoo-Cozumel /ICMyL-UNAM/Círculo Espeleológico de Mayab A. C.	La faune anchialine de l'île de Cozumel. <i>En</i> : Thomas C., Les grottes du Yucatan: Ile de Cozumel.	Mejia-Ortíz, L. M., M. López-Mejía, G. Bribiesca-Contreras, F. A. Solís-Marín y G. Yañez-Mendoza.	2013	Inventario de macroorganismos de las cuevas anquihalinas de la isla Cozumel.
13	UQRoo-Cozumel/Harvard University/ICMyL-UNAM	Morphological adaptations to anchialine species of five shrimp species (<i>Barbouria yanezi</i> , <i>Agostocaris bozanici</i> , <i>Procaris mexicana</i>	Mejía-Ortíz L. M., M. López-Mejía, J. Pakes, R. Hartnoll y E. Zarza-González.	2013	Análisis de las adaptaciones morfológicas del camarón anquihalino (<i>Procaris mexicana</i>), habitante del cenote El Aerolito.





No	Institución	Título	Autor(es)	Año	Resultados
		<i>Calliasmata nohochi</i> and <i>Typhlatya pearsei</i>).			
14	ICMyL-UNAM	Identification of echinoderms (Echinodermata) from an anchialine cave in Cozumel Island, Mexico, using DNA barcodes.	Bribiesca-Contreras, G., Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A. y Zaldívar-Riverón, A.	2013	Se utiliza un método de identificación de equinodermos en El Aerolito utilizando códigos de barra de ADN.
15	UAEM	Descripción de secuencias de ecolocación y determinación del uso de hábitat de murciélagos insectívoros aéreos en hábitats representativos de Cozumel, Quintana Roo, México.	Rincón, S. M.	2013	Se determino el uso del hábitat de 10 especies de murciélagos en hábitats representativos de la isla, incluyendo el cenote El Aerolito.
16	UABCS/ICMyL-UNAM	Anchialine Ecosystem El Aerolito (Cozumel, Mexico): Paradise of Cave Dweller Echinoderms. <i>En</i> : Whitmore, E. (Ed). Echinoderms Ecology, Habitats and Reproductive Biology.	Calderón-Gutiérrez, F., Solís-Marín, F. A. y Sánchez-Ortíz, C. A.	2014	Actualización de los equinodermos registrados en el cenote El Aerolito.
17	UABCS/ICMyL-UNAM/IB-UNAM/Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	Mexican anchialine fauna –With emphasis in the high biodiversity cave El Aerolito.	Calderón-Gutiérrez F., Solís-Marín F. A. P. Gómez, Sánchez C., P. Hernández-Alcántara, F. Álvarez-Noguera y G. Yañez-Mendoza.	2017	Análisis de la biodiversidad presente en el cenote El Aerolito.
18	Texas A&M University/UABCS/CIBNOR	Ecological patterns in anchialine caves.	Calderón-Gutiérrez, F., C. A., Sánchez-Ortíz y L. Huato-Soberanis.	2018	Análisis de los patrones ecológicos de cuevas anquihalinas incluyendo al cenote El Aerolito.





No	Institución	Título	Autor(es)	Año	Resultados
20	UQroo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	La biodiversidad oculta: en los cenotes de la Isla de Cozumel.	Ruíz-Cancino, G., L. M. Mejía-Ortíz y G., Yáñez-Mendoza.	2019	Artículo de divulgación sobre la riqueza subterránea de Cozumel.
21	ICMyL-UNAM	Dark offshoot: phylogenomic data sheds light on the evolutionary history of a new species of cave brittle star.	Bribiesca-Contreras, G., Pineda-Enríquez, T., Márquez-Borrás, F., Solís-Marín, F. A., Verbruggen, H., Hugall, A. F. y O'Hara, T.	2019	Se describe al ofiuero (<i>Ophionereis commutabilis</i>), especie endémica del cenote El Aerolito.
22	ICMyL-UNAM/UQRoo-Cozumel	Troglomorphism in the brittle star <i>Ophionereis commutabilis</i> Bribiesca-Contreras et al., 2019 (Echinodermata, Ophiuroidea, Ophionereididae).	Márquez-Borrás, F., F. A. Solís-Marín y L. M. Mejía-Ortíz.	2020	Primer análisis de las adaptaciones morfológicas del ofiuero (<i>Ophionereis commutabilis</i>) endémica de El Aerolito.
23	Texas A&M University, UQroo-Cozumel/Círculo Espeleológico del Mayab A. C.	Changes in organic matter sedimentation impact benthic meiofaunal communities in the marine sector of karst subterranean estuaries.	Brankovits, D., S. N., Little, T. S., Winkler, A. E., Tamalavage, L. M., Mejía-Ortíz, C. R., Maupin, G. Yáñez-Mendoza y P. J., Van Hengstum.	2021	Análisis de los cambios en la materia orgánica en las comunidades de la meiofauna en la parte marina del cenote El Aerolito.
24	ICMyL-UNAM/Texas A&M University	New species of <i>Microscleroderma</i> and <i>Amphipleptula</i> (Demospongiae, Tetractinellida, Scleritodermidae) from two contrasting marine environments.	Gómez, P. F., Calderón-Gutiérrez, C. González-Gándara y M. A., Rojas-Terán.	2021	Se describe por primera vez a la demosponja (<i>Amphipleptula aaktun</i>) exclusiva del sistema de cavernas del cenote El Aerolito.
25	UAERoo-Cozumel	Subterranean water in the Mayan Riviera of Yucatan Peninsula: Vulnerability and the importance of their monitoring. <i>En: Massarelli C (Ed). Limnology – The</i>	Mejía-Ortiz, L. M., A. L., Collantes-Chávez-Costa, C., López-Contreras y O., Frausto-Martínez.	2022	Descripción del funcionamiento de los ecosistemas subterráneos con conexión marina directa, usando al sistema del cenote El





No	Institución	Título	Autor(es)	Año	Resultados
		importance of monitoring and correlations of lentic and lotic waters.			Aerolito como ejemplo.

Los proyectos actualmente vigentes en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, las instituciones e investigadores encargados son:

- Biodiversidad subterránea en el estado de Quintana Roo. CONACYT/SEP/UQRoo-Cozumel. Responsable Dr. Luis M. Mejía-Ortíz
- Illuminating Cave Benthos in Subterranean Estuaries- Biodiversity, Ecology, and Role in Coastal Ecosystem Functioning. National Science Foundation. Responsables: Dra. Joan M. Bernhard de Woods Hole Oceanographic Institution y Dra. Elizabeth Borda de Texas A&M University-San Antonio
- Asimilación de materia orgánica y producción primaria en peces de la familia Poeciliidae en el cenote “El Aerolito” usando isótopos estables ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$), en Cozumel, México. UQRoo-Cozumel. Responsable: Dra. Martha Gutiérrez Aguirre.

Conforme al artículo 45, fracción IV, de la LGEEPA, con el establecimiento del APFF Cenote Aerolito, se promoverá la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio. De esta manera, en coordinación con la dirección del ANP y en apego a las reglas administrativas del futuro programa de manejo, las instituciones académicas y dependencias contarán con los elementos necesarios para dar continuidad a los estudios y actividades enfocadas en la generación de conocimiento y conservación de la biodiversidad de este importante ecosistema, el estado actual de las poblaciones de especies endémicas y el mantenimiento de sus funciones ecológicas y servicios ambientales que provee.

F) PROBLEMÁTICA ESPECIFICA QUE DEBA TOMARSE EN CUENTA

Aunque existen elementos para considerar que actualmente la biota y los ecosistemas de la propuesta de APFF Cenote Aerolito se encuentran en un estado relativamente saludable, existen diversas problemáticas y amenazas, históricas y actuales, que enfrenta el sitio.

Con base en la información analizada en el presente estudio, y considerando que los ecosistemas dentro de la propuesta de ANP no están aislados y tienen una fuerte relación en sus dinámicas y flujos de energía, se han identificado una serie de riesgos factores antropogénicos que impactan o podrían impactar de forma general a corto y mediano plazo, a este inigualable ensamble ecológico, y que se ejemplifican y muestran de forma esquemática en la Figura 61:

- **Deforestación y cambio de uso de suelo.** Desde hace varios años los ecosistemas terrestres aledaños a la propuesta de ANP han sido fuertemente impactados por la construcción de desarrollos turísticos e infraestructura hotelera asociada.

Uno de los impactos más significativos en el área, se dio a partir de 2008 con la autorización de cambio de uso en terrenos forestales, para la construcción, operación y mantenimiento del



Centro Integralmente Planeado (CIP) Marina FONATUR Cozumel (más de 43 ha), enfocado en desarrollar y operar una marina para turismo náutico de alto poder adquisitivo (FONATUR, 2020; 2021).

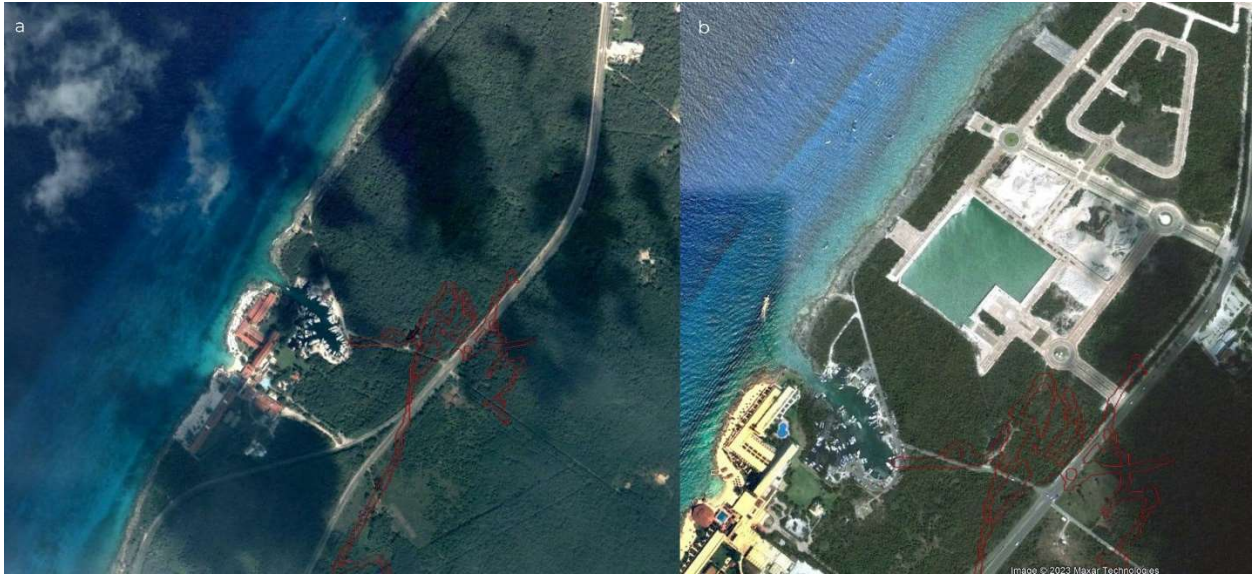


Figura 61. Cambios de uso de suelo a través del tiempo derivado de la construcción de infraestructura turística aledaña a la propuesta de APFF Cenote Aerolito, la imagen a) corresponde a 2003 y la b) a 2010. Se aprecia la construcción de la Marina FONATUR Cozumel.

Asimismo, diferentes proyectos de infraestructura turística y hotelera se encuentran en desarrollo, como la ampliación de la Marina FONATUR Cozumel y el Hotel Boutique Cozumel II, con la amenaza implícita de afectaciones a las comunidades vegetales aledañas al cenote El Aerolito que, como se ha descrito a lo largo del presente estudio, son las principales fuentes exportadoras de la materia orgánica que sostiene al ecosistema (FONATUR, 2018; FONATUR, 2021).

- **Contaminación por hidrocarburos y aguas residuales.** Aunque en las aguas superficiales del cenote El Aerolito los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de metales pesados se mantienen en valores por debajo de las concentraciones indicadas en los criterios ecológicos y normas oficiales, en la zona colindante a la propuesta de ANP se han registrado desde hace algunos años variables en dichos parámetros que indican potenciales afectaciones (FONATUR, 2018).

En playas cercanas a La Caleta, donde el túnel que conecta con el cenote sale al mar, se han registrado valores elevados de bacterias coliformes y materia orgánica proveniente de aguas residuales de los hoteles e instalaciones de la marina aledaños, además de parámetros altos de turbiedad, que hace que se considere cierto grado de contaminación en estas aguas (INE-SEMARNAP, 1998; FONATUR, 2018).

Sin embargo, la principal fuente de afectación al sistema proviene de las actividades que se realizan actualmente en la marina La Caleta, que, al ser un lugar de amarre y pernocta de





embarcaciones, consisten en maniobras de atraque, carga de combustibles, aceites, mantenimiento y reparación de embarcaciones. La problemática en esta zona se centra en la contaminación por derrame de hidrocarburos, desechos sólidos y azolve del fondo marino (INE-SEMARNAP, 1998).

- **Turismo y visitación no regulada.** El acceso al cenote El Aerolito no está regulado y cualquier persona puede acceder al humedal. Esto ha llevado a la acumulación de cientos de kilos de basura y desechos en sus alrededores. Estas actividades además producen un desplazamiento de la fauna (como cocodrilos y aves), sobre todo en periodos vacacionales donde su visitación aumenta.

Existen actividades realizadas y otras que podrían llevarse a cabo en el corto o mediano plazo que podrían tener un impacto negativo en la biodiversidad del sistema. Actualmente se practica el espeleobuceo dentro del sistema que, aunque de muy baja intensidad (9-16 buzos al mes), podría impactar al cenote El Aerolito por la liberación de burbujas que pueden alterar los tapetes bacterianos y por lo tanto el resto de la comunidad, además la iluminación utilizada podría afectar los hábitos conductuales permitiendo que ingresen depredadores como se ha reportado con algunos peces (Calderón-Gutiérrez, 2013).

- **Especies exóticas e invasoras.** Se les llama especies exóticas a las especies que no son originarias de un lugar, histórica y actualmente; éstas pueden volverse invasoras, es decir, que pueden tener una gran capacidad de colonización y dispersión lo que en muchas ocasiones impacta negativamente en las poblaciones de especies nativas debido a la depredación y competencia de recursos. Actualmente, las especies exóticas invasoras son reconocidas como la segunda causa de amenaza y extinción de especies, tan sólo detrás de la pérdida de hábitat. Su presencia deteriora los ecosistemas y, en consecuencia, los servicios ambientales, dañan la infraestructura pública, degradan las tierras de cultivo, afectan la producción de alimentos y la calidad del agua y son una amenaza para la salud pública. Por lo anterior, sus impactos pueden significar elevados costos económicos, tanto por el daño directo como por el gasto invertido en su control o erradicación (Daehler, 2001; Lowe *et al.*, 2004; Pimentel *et al.*, 2005).

En la propuesta de APFF Cenote Aerolito se han registrado 10 especies exóticas y exóticas invasoras (tres plantas y siete animales). Particularmente la boa (*Boa imperator*), introducida en los años 70, se ha establecido en prácticamente toda la isla y es abundante, lo que ha causado severos daños en la biota nativa, incluyendo especies endémicas. Al ser un depredador generalista ante el cual la biota nativa no cuenta con estrategias de defensa, algunas de las poblaciones de especies endémicas se han tornado extremadamente escasas y que estén en crítico peligro de extinción, especialmente roedores y aves (Martínez-Morales y Cuarón, 1999; González-Baca, 2006; CONANP-SEMARNAT, 2016).





F.1) VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

Para comprender la vulnerabilidad al cambio climático en una región es indispensable identificar las problemáticas climáticas que se han suscitado a lo largo del tiempo en la zona, sus tendencias y los eventos extremos que se han presentado. A su vez es necesario considerar los escenarios de cambio climático que afectarán los patrones de temperatura y precipitación y aumento del nivel del mar, bajo diferentes contextos de emisión de gases de efecto invernadero y horizontes temporales a nivel global (INECC, 2019).

La posición geográfica de México, sus condiciones climáticas, orográficas e hidrológicas, entre otros factores, contribuyen a que nuestro territorio sea particularmente vulnerable y esté expuesto a eventos hidrometeorológicos extremos que pueden causar severos daños ecológicos y socioeconómicos. Se prevé que la frecuencia e intensidad de estos fenómenos aumente por el cambio climático y, en consecuencia, sus impactos (CONANP, 2015; INECC, 2019).

Por esto, en un contexto de incertidumbre climática, es prioritario seguir consolidando los procesos de adaptación ante las amenazas que enfrentan la población, las actividades económicas, la infraestructura y los ecosistemas. El análisis de la vulnerabilidad es el primer paso en el proceso de adaptación al cambio climático; permite identificar cuáles son las principales amenazas climáticas en el territorio, los problemas relacionados con éstas y sobre todo determinar las causas subyacentes que pueden incrementar los impactos en la sociedad (INECC, 2019).

Las proyecciones de los escenarios de cambio climático para México en el siglo XXI muestran un aumento de temperatura promedio anual que va de 0.5 a 2 °C para el periodo de 2015-2039 y de hasta de 3.7 °C para finales de siglo. Los incrementos podrían ser más notables en el norte del país, con un ascenso de la temperatura en la próxima década que podría llegar a 2 °C para las zonas áridas y semiáridas del norte de México, que representan casi la mitad del territorio, lo anterior significa periodos de sequía más largos (CONANP, 2015).

En el caso de la precipitación, la incertidumbre es mayor con relación a los cambios proyectados. Los análisis sugieren un decremento de hasta el 84% de precipitación en algunas zonas del país. Sin embargo, en otras zonas como las tropicales y templadas, al sur y occidente del país, la planicie costera del Pacífico, la península de Yucatán, la vertiente del Golfo de México y las partes intermedias de las cadenas montañosas, se proyecta un aumento en la intensidad de la precipitación, lo que podría incrementar las posibilidades de ocurrencia de inundaciones y deslaves de tierra (CONANP, 2015).

Otra amenaza de gran relevancia es el aumento en el nivel medio del mar. Durante el periodo 1901-2010, éste se elevó 0.19 m (intervalo de 0.17 a 0.21 m). En el caso de México, los pronósticos indican que las regiones costeras del sureste podrían sufrir los mayores impactos, por ejemplo, perdiendo playas o afectando acuíferos (CONANP, 2015).

Conforme a lo anterior, tanto al interior de la propuesta de APFF Cenote Aerolito y sus ecosistemas, como a nivel regional, se identificaron las principales amenazas climáticas o relacionadas al cambio climático que se están presentando o podrían surgir y aumentar su impacto en la isla de Cozumel bajo escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. De estas amenazas se detallan, en caso de existir, los principales impactos históricos, así como los impactos potenciales en el contexto de cambio climático.





Aumento de la temperatura

De acuerdo con el Programa de Acción Estatal ante el Cambio Climático, en Quintana Roo se espera que un mayor incremento de la temperatura contribuya a la desecación de humedales y afecte la distribución de las especies. Para la isla Cozumel, se proyecta que la exposición de los sistemas lagunares a las altas temperaturas provoque una disminución de la columna de agua, creando condiciones de hipersalinidad que podrían afectar a las comunidades de manglar que se desarrollan en sus bordes (GQROO *et al.*, 2013; Torres-Rodríguez *et al.*, 2018).

Las cuevas, ya sea en tierra o bajo el agua, son entornos relativamente estables, con fluctuaciones pequeñas, en su mayoría predecibles. Sin embargo, en los ambientes anquialinos los cambios de temperatura a mediano plazo (como el calentamiento global) pueden afectar a la fauna de manera irreversible. El aumento constante y paulatino de la temperatura de los océanos, casi 1° C en promedio durante los últimos 20 años, repercute y tiene un impacto sobre las condiciones marinas del subsuelo del cenote dado que no es un sistema aislado, existiendo además una amplia gama de fauna marina que ingresa al cenote en busca de refugio, protección y alimento, Esta biota se encuentra en estado vulnerable principalmente por los cambios de temperatura (EPA, 2021; Mejía-Ortíz *et al.*, 2022).

Por ejemplo, en cuevas submarinas del Mediterráneo se han documentado mortandades masivas por esta razón. En las cuevas anquialinas de la isla de Cozumel, la mayoría de sus especies endémicas y microendémicas podrían estar ya en peligro de extinción, especialmente teniendo en cuenta el cambio de uso de suelo por la fuerte presión de desarrollos turísticos y la contaminación antropogénica, principalmente el vertido de aguas de desecho a los drenajes naturales y sistemas subterráneos (INE-SEMARNAP, 1998; Calderón-Gutiérrez, *et al.*, 2018).

El incremento de temperaturas añadiría mayor presión a dichos ecosistemas. De ahí que resulte fundamental la aplicación de medidas para su conservación en un contexto de variabilidad climática, teniendo en cuenta que los potenciales efectos del cambio climático empiezan a registrarse al interior del sistema subterráneo inundado (Calderón-Gutiérrez, *et al.*, 2018; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019).

Desde 2016, en algunos cenotes de Cozumel, incluyendo El Aerolito, se han colocado sensores para la medición de los principales parámetros fisicoquímicos. Durante los dos primeros años de monitoreo se registró un aumento gradual en la temperatura del agua a más de 30 m de profundidad del orden de 0.15 °C, lo cual evidencia que estos sistemas no están aislados de las problemáticas en la superficie (Mejía-Ortíz *et al.*, 2007b; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019).

La conexión directa entre el mar y el cenote El Aerolito conlleva una mayor relación entre el ingreso de materia orgánica y energía desde el mar y hacia el mar con la variación de temperatura costera que en los últimos años se ha presentado, lo que produce un sistema con una haloclina dinámica en todo momento (Mejía-Ortíz *et al.*, 2007b; Brankovits, 2021; Mejía-Ortíz *et al.*, 2022).

Si bien todo el tiempo está fluyendo una masa de agua dulce hacia el mar, al aumentar la depositación por precipitación de agua en las áreas circundantes en época de lluvias o derivado de eventos hidrometeorológicos extremos (tormentas tropicales y/o huracanes) se producen cambios en la profundidad de la haloclina con los consecuentes impactos en la biota del bentos del sistema cavernícola (Calderón-Gutiérrez, *et al.*, 2018).





Estudios sobre patrones ecológicos en cuevas anquialinas de la isla de Cozumel, en particular en los cenotes La Quebrada, El Aerolito, Tres Potrillos y Bambú, reportan cambios cíclicos estacionales del orden de magnitud de 0.5° C. Actualmente el monitoreo de esta y otras variables ambientales, así como de biota continua, por lo que es probable que en el corto y mediano plazo se empiecen a observar los efectos directos de dichos cambios sobre la riqueza, abundancia y supervivencia de la biota de estos sitios, especialmente la microendémica (Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2018).

En este sentido, desde hace varios años en la propuesta de ANP se han desarrollado estudios de línea base ecológica que proporcionan un punto de referencia cuantitativo de la estructura de la comunidad y son los primeros pasos para un esfuerzo de monitoreo a largo plazo. La continuidad de los monitoreos permitiría la detección de variaciones fisicoquímicas y la identificación de los factores (naturales y/o antropogénicos) que las provocan, proporcionando así una herramienta útil y puntual para el manejo y protección de este ecosistema único en el país (Calderón-Gutiérrez y Sánchez-Ortiz, 2012; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Dentro de las acciones de monitoreo de los impactos y las perturbaciones inducidas por el cambio climático en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, es fundamental considerar indicadores biológicos que ya han sido registrados de manera sistemática en las ANP de la región y que pueden resultar muy prácticos en términos de costo. La CONANP, a través de su Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC), desarrolla en distintas zonas de la península de Yucatán actividades de monitoreo que pueden revelar información importante sobre impactos que podrían estar asociados al cambio climático, y establecer estrategias de mitigación de dichos efectos, sobre todo considerando la presencia de biota microendémica del sistema de cavernas del cenote El Aerolito (March *et al.*, 2011).

Aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos

Considerando que los modelos de cambio climático proyectan un aumento en la frecuencia y fuerza de los huracanes y tormentas tropicales, el riesgo para las especies que habitan cuevas anquialinas poco profundas se magnifica (Calderón-Gutiérrez, *et al.*, 2018).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) clasifica al municipio de Cozumel, con un grado alto de peligro por la presencia de tormentas tropicales y huracanes. De acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA, por sus siglas en inglés); en los últimos 169 años (1852 a 2021), el municipio ha sido afectado por el impacto de 103 eventos hidrometeorológicos tropicales, que han alcanzado categorías de depresión tropical, tormenta tropical, así como huracanes categoría 1 a 5 en la escala Saffir-Simpson, los cuales han ocurrido en los meses de mayo a noviembre (Tabla 18 y Figura 62). En los años 1967, 1980, 1988 y 2005 se presentaron los huracanes más poderosos y destructivos: Beulah categoría 5, Gilbert categoría 5 y Wilma y Emily también categoría 5. La presencia de estos eventos ha provocado cinco declaratorias de desastre y seis declaratorias de emergencia ante la magnitud de sus afectaciones (CENAPRED, 2021; 2022; NOAA, 2022).





Tabla 18. Registro histórico reciente (1995-2017) de huracanes que han impactado al estado de Quintana Roo.
Fuente: INEGI (2016).

Año	Huracán	Lugar entrada a tierra	Etapa y categoría	Periodo	Vientos máximos (km/hr)
1995	Roxane	Tulum	Huracán categoría 3	7 al 21 de octubre	185
1996	Dolly	Felipe Carrillo Puerto	Huracán categoría 1	19 al 25 de agosto	125
2000	Keith	La Unión	Huracán categoría 1	28 de septiembre al 6 de octubre	140
2005	Emily	Cozumel y Playa del Carmen	Huracán categoría 5	10 al 21 de Julio	269
2005	Wilma	Cozumel y Puerto Morelos	Huracán categoría 5	15 al 28 de octubre	324
2007	Dean	Mahahual	Huracán categoría 5	13 al 23 de agosto	270
2008	Arthur	Suroeste de Chetumal	Huracán categoría 2	31 de mayo a 2 de junio	160
2008	Dolly	Cozumel y Cancún	Huracán categoría 2	20 al 24 de Julio	160
2010	Karl	Al norte del poblado de Calderitas	Huracán categoría 3	14 al 18 de septiembre	195
2011	Rina	Felipe Carrillo Puerto, Cozumel, Isla Mujeres y Benito Juárez	Huracán categoría 2	23 al 28 de octubre	174
2011	Harvey	Othón P. Blanco y Bacalar	Tormenta Tropical	19 al 22 de agosto	91
2011	Don	Benito Juárez	Tormenta Tropical	27 al 30 de Julio	83
2012	Ernesto	Othón P. Blanco y Bacalar	Huracán categoría 1	1 al 10 de agosto	140
2014	Hanna	José María Morelos	Tormenta tropical	22 al 28 de octubre	64
2016	Colin	Isla Mujeres, Cozumel, Solidaridad, B. Juárez. Cárdenas, Puerto Morelos	Tormenta tropical	Del 05 al 07 de junio	83
2016	Earl	Othón P. Blanco	huracán categoría 1	Del 02 al 06 de agosto	120
2017	Harvey	Felipe C. Puerto, Othón P. Blanco, Tulum, José M. Morelos, Bacalar.	Huracán categoría 4	Del 17 de agosto al 01 de septiembre	213
2017	Nate	Cozumel, B. Juárez, P. Morelos, I. Mujeres, L. Cárdenas, Solidaridad, Tulum	Huracán categoría 1	Del 04 al 09 de octubre	148
2017	Franklin	Tulum, Felipe C. Puerto, José María Morelos, Bacalar, Othón P. Blanco	Huracán categoría 1	Del 07 al 10 de agosto	138



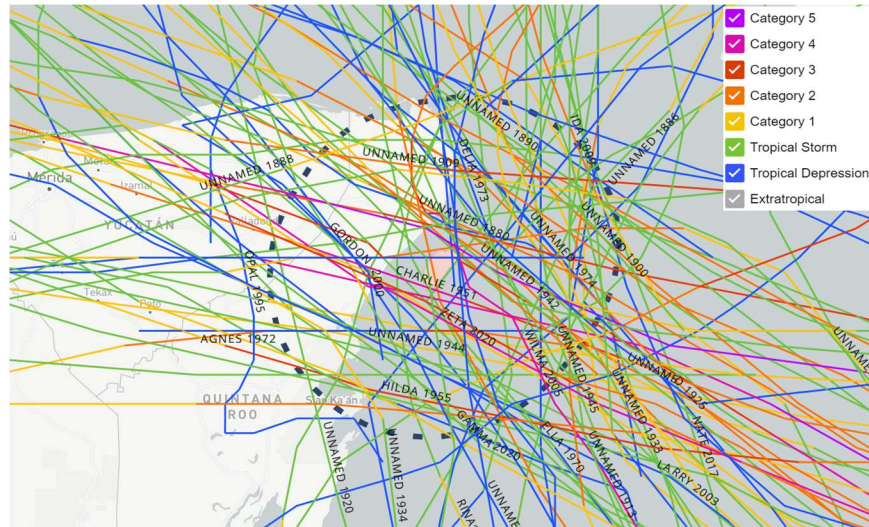


Figura 62. Eventos meteorológicos extremos (huracanes y tormentas tropicales) que han afectado al municipio de Cozumel. Fuente: NOAA (2022).

Aunado a los fenómenos atmosféricos tropicales, el CENAPRED cataloga al municipio de Cozumel con un nivel de peligro alto por inundación, y que su valor umbral de precipitación² acumulada en 12 horas es de 113.15 mm. Sin embargo, existen condiciones que con precipitaciones de menor valor podrían generar inundaciones, por ejemplo, cuando ocurren lluvias continuas durante varios días, éstas saturan el suelo y con ello se pierde capacidad de infiltración. En zonas urbanizadas, la falta de mantenimiento a la infraestructura hidráulica y sistemas de drenaje disminuye la capacidad de desalojo de agua pluvial, por lo que una cantidad de precipitación menor al umbral podría generar afectaciones por inundación (CENAPRED, 2016; 2021; 2022).

Un indicativo de la incidencia de inundaciones es el número de declaratorias de emergencia o desastre por lluvia severa e inundación fluvial y pluvial emitidas para la entidad. De 2000 a 2019 en el municipio de Cozumel se han registrado 11 eventos de inundación, uno en 2015, uno en 2016, dos en 2017, tres en 2018, uno en 2019 y tres en 2020 (CENAPRED, 2021; 2022).

Los huracanes y fenómenos asociados generan erosión de las playas, desgaste del paisaje y pérdida de biodiversidad. También contribuyen a los procesos de desertificación, ejemplo de ello fue el huracán Gilberto, que destruyó grandes extensiones de selva en Quintana Roo, y al siguiente año, los restos de la vegetación (hojarasca, troncos y ramas caídos), sirvieron de combustible para los incendios que cubrieron una gran extensión. La mayoría de los ecosistemas costeros y selváticos de Cozumel fueron devastados por este fenómeno. En 2005, el huracán Wilma ocasionó severas afectaciones en la fauna y en flora de la isla, por el efecto del agua del mar que entró en la tierra, además de cuantiosos daños económicos (Carrillo-Fajardo *et al.*, 2011; Palafox-Muñoz y Gutiérrez-Torres, 2013; Torres-Rodríguez *et al.*, 2018).

Por otro lado, la herramienta “Climate Information Platform” en un escenario de bajas emisiones de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés) 4.5 con un horizonte

² Se entiende por umbral al valor de lluvia acumulada a partir del cual se pueden esperar afectaciones por inundación (CENAPRED, 2021).





cercano (2011-2040), indica que para la precipitación media anual se espera un incremento del 1.3% respecto al histórico. Por otro lado, en el horizonte medio (2041-2070), los modelos de circulación general coinciden en un aumento de 6.19% en la disponibilidad del recurso hídrico y para el periodo lejano (2071-2100) una disminución al -0.30%. El aumento en el porcentaje de lluvia acumulada anual supone una mayor disponibilidad del recurso hídrico, lo que podría resultar en eventos de precipitación diaria que puedan sobrepasar el umbral medio de precipitación diaria lo que resultaría en un aumento en las inundaciones pluviales (SMHI, 2023).

Aunque el conocimiento sobre el impacto de tormentas o huracanes en las cuevas anquialinas es limitado, se debe considerar que, con el aumento de la frecuencia y la fuerza de estos fenómenos, previsto por los modelos de cambio climático, el riesgo para las especies que habita cuevas poco profundas cercanas al fondo se magnifica. En el cenote El Aerolito, se ha reportado el desplazamiento de organismos bentónicos a zonas más profundas y la presencia de organismos muertos o muy débiles ante alteraciones en la columna de agua, luego de una tormenta de ocho días (Calderón-Cutiérrez, *et al.*, 2018).

Aumento del nivel del mar

Las principales causas del incremento del nivel del mar actual están relacionadas con el cambio climático debido al agua agregada por el derretimiento de las capas de hielo y glaciares, así como por la expansión del agua de mar a medida que se calienta (NASA, 2018).

En su último informe el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) reportó que el nivel medio del mar se incrementó entre 0.15 y 0.25 m entre 1901 y 2018. Por otro lado, en el Programa de Adaptación al Cambio Climático del Corredor Isla Mujeres-Puerto Morelos, reporta que durante el periodo 1993 a 2017, el incremento en el nivel medio del mar en esta zona cercana a la isla de Cozumel se ha incrementado a una tasa promedio de 4.04 mm anuales (CONANP-PNUD, 2019; IPCC, 2021).

Con el objeto de contar con información sobre los escenarios de aumento del nivel del mar para la región donde se encuentra la propuesta de ANP se utilizó la herramienta de proyección del nivel del mar de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) (NASA, 2023).

Para ello se tomó el punto más cercano de referencia que corresponde a Cabo de San Antonio, en Cuba, que cuenta con información disponible en la plataforma. En la se observa que bajo un forzamiento radiativo de 4.5 W/m² un nivel de aumento de 0.5 m respecto al período 1995-2014 se podría alcanzar entre 2059 y 2082; mientras que bajo un forzamiento radiativo de 8.5 W/m² este aumento de nivel del mar se alcanzaría entre 2055 y 2075. Por otro lado, un aumento de un metro se podría alcanzar entre 2097 y hasta después de 2150 bajo un forzamiento de 4.5 W/m²; mientras que bajo un forzamiento radiativo 8.5 W/m² este aumento del nivel del mar se alcanzaría entre 2086 y 2130 (NASA, 2023) (Figura 63).



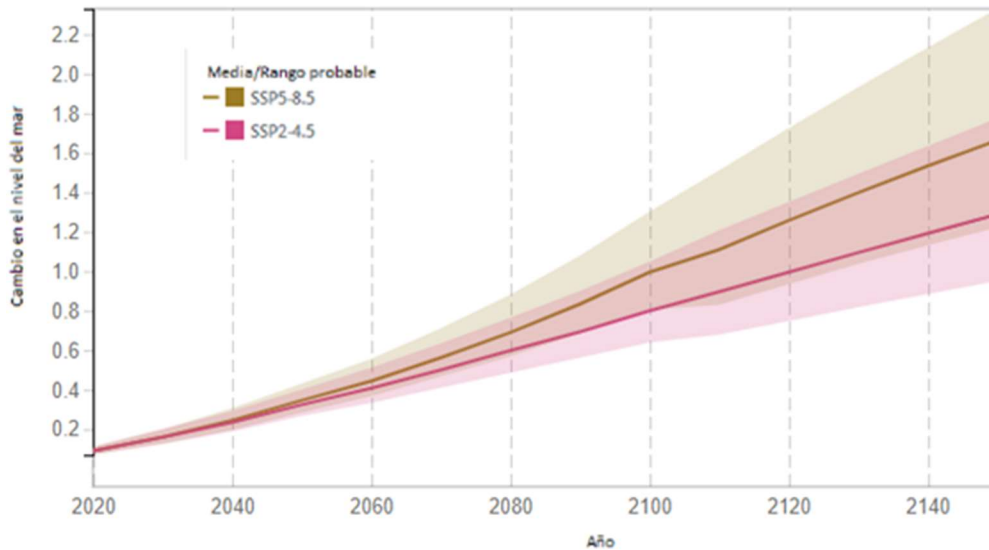


Figura 63. Modelos de aumento del nivel del mar bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y 8.5 para Cabo de San Antonio, Cuba, sitio cercano a la isla de Cozumel. Adaptado de NASA (2023).

Los niveles de aumento del nivel del mar antes mencionados se consideraron ya que ambos valores podrían presentarse durante el presente siglo. Al visualizar las zonas de inundación por aumento del nivel del mar en la plataforma “Climate Central” se observa que las zonas inmediatamente adyacentes a la línea de costa se verían afectadas, así como una porción al noroeste de la propuesta de ANP (Climate Central, 2023) (Figura 64).

Con este aumento, el oleaje del mar durante tormentas y ciclones tropicales también podría afectar zonas que previamente no recibían impactos, lo que tendrá repercusiones para los complejos turísticos de la zona. Algunos hoteles, los embarcaderos, emplazamientos de prestadores de tours y la terminal de cruceros podrían estar entre los principales afectados. En un escenario de aumento de un metro, la Carretera Costera Sur de la isla, también podría sufrir afectaciones en su tramo al norte de la terminal de cruceros.

En Cozumel, las áreas inundables por un aumento del nivel del mar se localizan en las zonas bajas de los extremos norte y sur de la isla. Aunque el polígono de la propuesta de APFF Cenote Aerolito no se ubica en estas zonas, es preciso considerar que los efectos del aumento del nivel del mar sobre el sistema de cenotes y demás humedales, que constituyen reservorios de biodiversidad y atractivos turísticos, generarán impactos negativos en diversos sectores (Torres-Rodríguez *et al.*, 2018).

Finalmente, para las zonas costeras se prevé que el aumento del nivel del mar contribuya a intensificar la fragmentación y pérdida de hábitat. La elevación en el nivel del mar aumentará la erosión costera poniendo en peligro numerosas playas naturales en todo el mundo. Asimismo, dado que, en la península de Yucatán, el sistema subterráneo es la única fuente de agua dulce, bajo un escenario de aumento del nivel del mar, se proyecta que el agua de mar superficial y los lentes de agua salada se desplacen de decenas de metros a kilómetros tierra adentro (Vitousek *et al.*, 2017; IPBES, 2019).



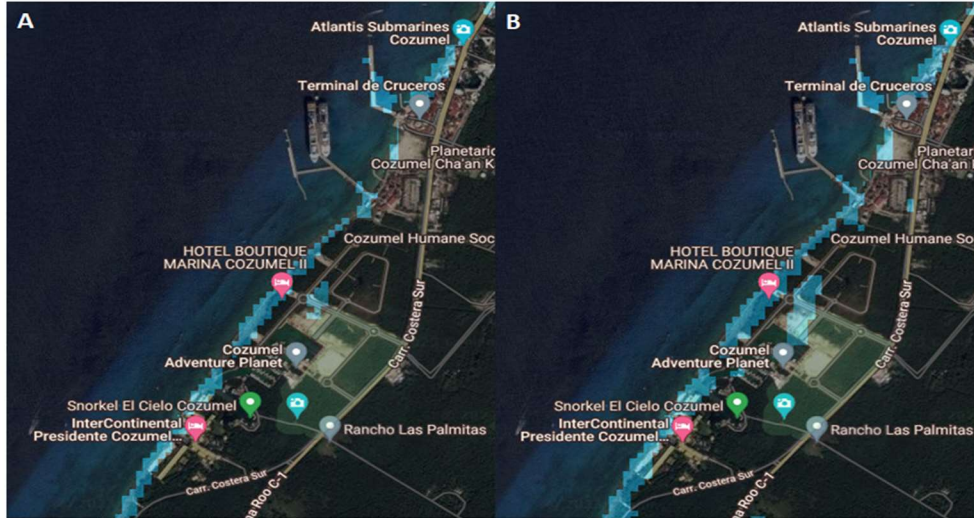


Figura 64. Escenarios de aumento del nivel de mar en franja costera de Cozumel cercana a la propuesta de APFF Cenote Aerolito. (A) escenario de aumento de medio metro. (B) escenario de aumento de un metro. Las zonas de inundación potencial se representan con píxeles azul claro. Fuente: Climate Central (2023).

En general, los modelos de extinción predicen que la fauna costera y nerítica se beneficia durante la subida del nivel del mar (transgresión), mientras que su retroceso (regresión) disminuye su área de hábitat idóneo y favorece los cuellos de botella evolutivos. La fauna anquialina de adaptación marina se beneficia de la expansión del hábitat durante las transgresiones, pero la fauna con adaptación al agua dulce y salobre debe emigrar y adaptarse a los cambios locales del hábitat o desaparecer regionalmente. A pesar de la omisión de toda esta categoría de ambientes y animales en las evaluaciones de riesgos del cambio climático, los modelos más recientes indican que la fauna anquialina de islas y plataformas bajas que dependen de las aguas subterráneas meteóricas son especialmente vulnerables a los cambios de hábitat provocados por el aumento del nivel del mar. De esta forma, la fauna única que habita el cenote El Aerolito resultaría susceptible ante estos cambios (Mejía-Ortiz *et al.*, 2013a; Calderón-Gutiérrez *et al.*, 2017; 2018; Van Hengstum *et al.*, 2019).

Finalmente, y dadas las amenazas y escenarios climáticos descritos, es evidente que conservar el patrimonio natural de México a través de las ANP, es una de las estrategias más efectivas para mitigar el cambio climático y sus efectos sobre los ecosistemas y la población, así como para contribuir a la adaptación, evitar el cambio de uso de suelo y la pérdida de carbono. Se calcula que cerca del 15% del carbono del mundo está almacenado en los sistemas de áreas protegidas (CONANP-PNUD, 2019).

La declaratoria del APFF Cenote Aerolito coadyuvará en la conectividad con otros espacios protegidos aledaños (terrestres y marinos) de la isla de Cozumel, preservando y haciendo más resilientes a sus ecosistemas ante fenómenos hidrometeorológicos extremos, lo que también funcionaría como una acción de adaptación al cambio climático, considerando que la mayoría de los ecosistemas de Quintana Roo son altamente vulnerables a los cambios climáticos (Morales-Contreras, *et al.*, 2022).

G) CENTROS DE POBLACIÓN EXISTENTES AL MOMENTO DE ELABORAR EL ESTUDIO

A la fecha de elaboración del presente estudio previo justificativo no existen centros de población al interior de la propuesta de Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito (INEGI, 2021).





IV. PROPUESTA DE MANEJO DEL ÁREA

A) ZONIFICACIÓN Y SU SUBZONIFICACIÓN A QUE SE REFIEREN LOS ARTÍCULOS 47 BIS Y 47 BIS 1 DE LA LGEEPA

La definición del polígono propuesto para el APFF Cenote Aerolito se elaboró con base en los insumos cartográficos proporcionados por Fonatur, información técnica recopilada, analizada y sistematizada, tanto en campo como en gabinete, donde se consideraron criterios ambientales, sociales, político-administrativos y económicos.

Asimismo, en el artículo 47 BIS 1, de la LGEEPA establece que:

“ARTÍCULO 47 BIS 1.- Mediante las declaratorias de las áreas naturales protegidas, podrán establecerse una o más zonas núcleo y de amortiguamiento, según sea el caso, las cuales a su vez, podrán estar conformadas por una o más subzonas, que se determinarán mediante el programa de manejo correspondiente, de acuerdo a la categoría de manejo que se les asigne.

...”

En este sentido, el artículo 47 BIS de la LGEEPA señala que para el cumplimiento de las disposiciones de dicha Ley con relación al establecimiento de las áreas naturales protegidas, se realizará una división y subdivisión que permita identificar y delimitar porciones del territorio que la conforman, acorde con sus elementos biológicos, físicos y socioeconómicos, por lo que, cuando se realice la delimitación territorial de las actividades en las áreas naturales protegidas, esta se llevará a cabo a través de las siguientes zonas y subzonas, de acuerdo con su categoría de manejo:

I. Las zonas núcleo, tendrán como principal objetivo la preservación de los ecosistemas y su funcionalidad a mediano y largo plazo, en donde se podrán autorizar las actividades de preservación de los ecosistemas y sus elementos, de investigación y de colecta científica, educación ambiental, y limitarse o prohibirse aprovechamientos que alteren los ecosistemas. Estas zonas podrán estar conformadas por las siguientes subzonas:

a) De protección: Aquellas superficies dentro del área natural protegida, que han sufrido muy poca alteración, así como ecosistemas relevantes o frágiles, o hábitats críticos, y fenómenos naturales, que requieren de un cuidado especial para asegurar su conservación a largo plazo.

En las subzonas de protección sólo se permitirá realizar actividades de monitoreo del ambiente, de investigación científica no invasiva en los términos del reglamento correspondiente, que no implique la extracción o el traslado de especímenes, ni la modificación del hábitat.

b) De uso restringido: Aquellas superficies en buen estado de conservación donde se busca mantener las condiciones actuales de los ecosistemas, e incluso mejorarlas en los sitios que así se requieran, y en las que se podrán realizar excepcionalmente actividades de aprovechamiento que no modifiquen los ecosistemas y que se encuentren sujetas a estrictas medidas de control.

En las subzonas de uso restringido sólo se permitirán la investigación científica no invasiva y el monitoreo del ambiente, las actividades de educación ambiental y turismo de bajo impacto ambiental, que no impliquen modificaciones de las características o condiciones naturales originales, y la construcción de instalaciones de apoyo, exclusivamente para la investigación científica o el monitoreo del ambiente, y





II. Las zonas de amortiguamiento, tendrán como función principal orientar a que las actividades de aprovechamiento, que ahí se lleven a cabo, se conduzcan hacia el desarrollo sustentable, creando al mismo tiempo las condiciones necesarias para lograr la conservación de los ecosistemas de ésta a largo plazo, y podrán estar conformadas básicamente por las siguientes subzonas:

a) De preservación: Aquellas superficies en buen estado de conservación que contienen ecosistemas relevantes o frágiles, o fenómenos naturales relevantes, en las que el desarrollo de actividades requiere de un manejo específico, para lograr su adecuada preservación.

En las subzonas de preservación sólo se permitirán la investigación científica y el monitoreo del ambiente, las actividades de educación ambiental y las actividades productivas de bajo impacto ambiental que no impliquen modificaciones sustanciales de las características o condiciones naturales originales, promovidas por las comunidades locales o con su participación, y que se sujeten a una supervisión constante de los posibles impactos negativos que ocasionen, de conformidad con lo dispuesto en los ordenamientos jurídicos y reglamentarios que resulten aplicables.

b) De aprovechamiento sustentable de los recursos naturales: Aquellas superficies en las que los recursos naturales pueden ser aprovechados, y que, por motivos de uso y conservación de sus ecosistemas a largo plazo, es necesario que todas las actividades productivas, se efectúen bajo esquemas de aprovechamiento sustentable.

En dichas subzonas se permitirán exclusivamente el aprovechamiento y manejo de los recursos naturales renovables, siempre que estas acciones generen beneficios preferentemente para los pobladores locales, la investigación científica, la educación ambiental y el desarrollo de actividades turísticas de bajo impacto ambiental.

Asimismo, el aprovechamiento sustentable de la vida silvestre podrá llevarse a cabo siempre y cuando se garantice su reproducción controlada o se mantengan o incrementen las poblaciones de las especies aprovechadas y el hábitat del que dependen; y se sustenten en los planes correspondientes autorizados por la Secretaría, conforme a las disposiciones legales y reglamentarias aplicables.

c) De uso público: Aquellas superficies que presentan atractivos naturales para la realización de actividades de recreación y esparcimiento, en donde es posible mantener concentraciones de visitantes, en los límites que se determinen con base en la capacidad de carga de los ecosistemas.

d) De recuperación: Aquellas superficies en las que los recursos naturales han resultado severamente alterados o modificados, y que serán objeto de programas de recuperación y rehabilitación, por lo que no deberán continuar las actividades que llevaron a dicha alteración.

En estas subzonas sólo podrán utilizarse para su rehabilitación, especies nativas de la región o en su caso, especies compatibles con el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas originales cuando científicamente se compruebe que no se afecta la evolución y continuidad de los procesos naturales.

Una vez integrado el presente estudio previo justificativo, se realizó un análisis biológico, físico y socioeconómico de la zona donde se ubica la eventual APFF Cenote Aerolito, así como sus principales objetos de conservación, mediante el cual se han determinado los elementos técnicos para que la propuesta de ANP este conformada por una zona núcleo y una zona de amortiguamiento (Tabla , Figura 65).





Tabla 19. Superficies totales de las zonas núcleo y amortiguamiento propuestas para el APFF Cenote Aerolito.

Zona	Superficie (ha)	%
Cenote Aerolito. Núcleo	3.624244	35.5
Paraíso. Amortiguamiento	6.574869	64.5
Total	10.199113	100

Zona núcleo

Esta zona denominada Cenote Aerolito (3.624244 ha) abarca la entrada al cenote y las asociaciones vegetales de selva baja subperennifolia y manglar circundantes. Su elevada biodiversidad y abundancia de macroinvertebrados cavernícolas están intrínsecamente relacionadas con los aportes de materia orgánica provenientes de la vegetación adyacente, especialmente del mangle rojo (*Rhizophora mangle*), especie incluida en la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo la categoría de Amenazada, y cuya superficie representa menos del 2% del total de la propuesta de ANP (Calderón-Gutiérrez, 2013; DOF, 2019).

La materia orgánica (principalmente hojarasca) que ingresa por la parte superficial del cenote es el factor clave que regula la funcionalidad ecológica del ecosistema y es determinante para la supervivencia de su biota cavernícola. Inicialmente esta fuente de energía es aprovechada por los tapetes bacterianos de las paredes y techo del cenote. Ahí, particularmente en secciones con haloclina, fragmentos de estas colonias bacterianas se desprenden y hunden transportando energía y recursos para los macroinvertebrados (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Calderón-Gutiérrez, 2013; Brankovits *et al.*, 2021).

En este sentido, la profundidad y morfología de los pasajes adyacentes a la entrada al cenote están estrechamente relacionadas con las variaciones en la riqueza y densidad de la biota, siendo mucho más limitada la disponibilidad de alimento en los sitios profundos, restringiendo el número de especies y densidad de organismos (Mejía-Ortiz, *et al.*, 2006; Calderón-Gutiérrez, 2013).

Conforme a lo anterior, la zona núcleo incluirá a las asociaciones de manglar adyacente, principal proveedor de materia orgánica del sistema subterráneo, los tapetes bacterianos de paredes y techo del cenote, zonas de haloclina, espeleotemas (estalactitas, estalagmitas y columnas) y varias cuevas y pasajes donde se han registrado las mayores abundancias y diversidad de equinodermos endémicos y microendémicos, incluyendo a la estrella de mar cavernícola (*Copidaster cavernicola*), registrada a 45 a m de la entrada (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2007; Solís-Marín y Laguarda-Figueras, 2007; Solís-Marín *et al.*, 2010) (Figura 66).

Asimismo, en la entrada al cenote y sus alrededores se han registrado especies incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 como el pez loro semáforo (*Sparisoma viride*), cocodrilo de río (*Crocodylus acutus*), la garza rojiza (*Egretta rufescens*), el maullador negro (*Melanoptila glabrirostris*); así como el mapache de Cozumel (*Procyon pygmaeus*) y el tejón de Cozumel (*Nasua narica* subsp. *nelsoni*), estas últimas especie y subespecie endémicas de la isla (Anexo 2).





Propuesta de Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
Abril 2023

Simbología

- Límite de la propuesta de área natural protegida
- Cuerpo de agua
- Línea de costa
- Carretera
- Marina
- Localidades

Zonificación

- Zona núcleo
- Zona de amortiguamiento

Fuentes de Información Cartográfica

INEGI, 2018. Carta Topográfica F16D71a 1: 20,000.
INEGI, 2021. Carta Topográfica F16D71 (Cozumel) Escala 1:50,000.
INEGI, 2021. Censo de Población y Vivienda 2020.
INEGI, 2022. Marco Geoestadístico. Diciembre.

Especificaciones Cartográficas

Proyección: UTM
Zona: 16 Norte
Datum: ITRF08
1:4,000
1 cm = 40 m
0 20 40 80
Metros

MEDIO AMBIENTE

CONANP

Zonificación

Figura 65. Zonificación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo. Se aprecia que la entrada al cenote y su vegetación circundante se encuentran en la zona núcleo.



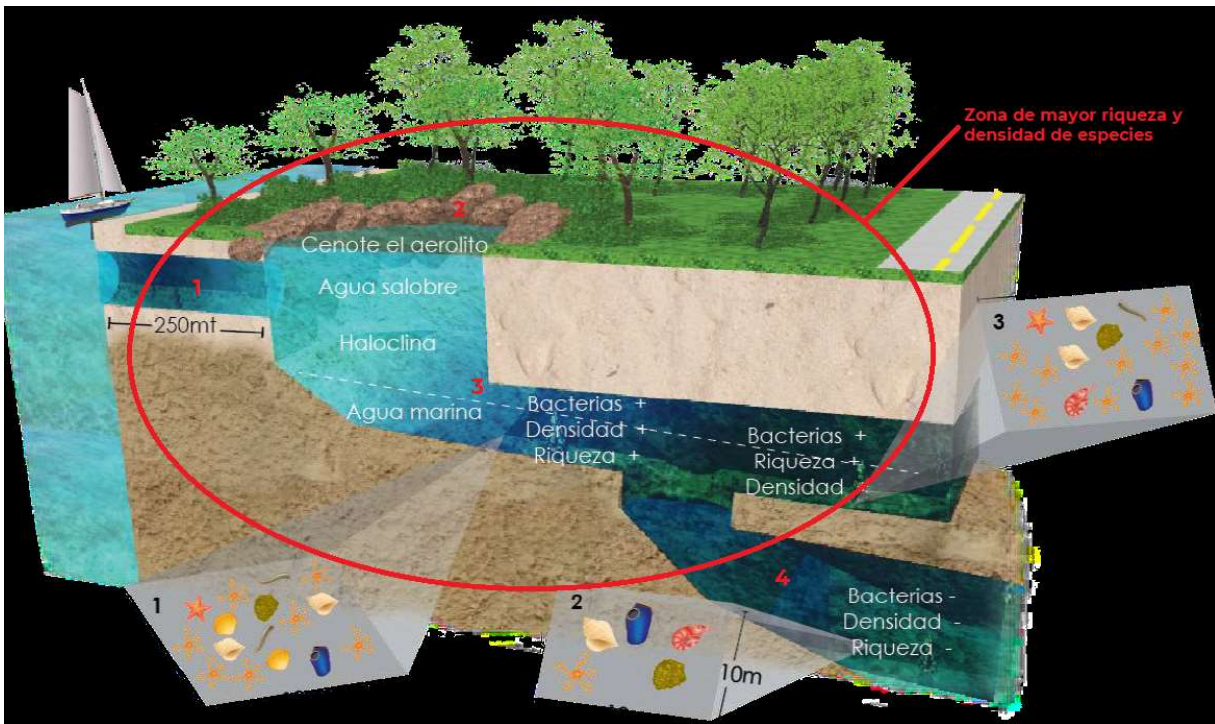


Figura 66. Esquematzación del cenote El Aerolito. Se aprecia que la mayor riqueza y densidad de especies se encuentra cercana a la entrada del sistema, resultado de tres factores principales: (1) cercanía a la conexión directa con el mar, (2) disponibilidad de materia orgánica proveída por el manglar circundante y tapetes bacterianos en paredes y techo del cenote y 3) presencia de haloclina. Conforme se incrementa la distancia y profundidad respecto a la abertura estos valores disminuyen (4). Modificado de Calderón-Gutiérrez (2013).

En adición, dada de la disponibilidad de recursos florales, dentro de la propuesta de zona núcleo se han registrado grupos funcionales de polinizadores como colibríes, entre ellos el colibrí esmeralda de Cozumel (*Cynanthus forficatus*), endémico de la isla, y murciélagos, estos últimos también representados con especies frugívoras y dispersoras de semillas, fundamentales para el correcto funcionamiento del humedal (Mendoza, 2011; Rincón, 2013; Morales-Contreras et al. 2020).

Las actividades en la zona núcleo estarán enfocadas a la preservación del ecosistema y su biodiversidad, la investigación y colecta científica, la educación ambiental, y se limitaran o prohibirán los aprovechamientos que alteren al humedal y sus procesos biológicos y ecológicos.

Zona de amortiguamiento

La zona de amortiguamiento, denominada Paraíso, cuenta con 6.574869 ha constituidas principalmente por selva baja subperennifolia, selva mediana subperennifolia, tular y zonas inundables. Tendrá como función principal orientar a que las actividades que se llevan a cabo en ella estén enfocadas hacia un desarrollo sustentable, fomentando las condiciones necesarias para lograr la conservación de este importante sistema cavernícola.





B) TIPO O CATEGORÍA DE MANEJO

Conforme a lo establecido en el Artículo 46, fracción VII de la LGEEPA, se propone que la propuesta de ANP Cenote Aerolito tenga la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna debido a que cumple con las especificaciones establecidas en el artículo 54 de dicha Ley, que señala:

ARTÍCULO 54.- Las áreas de protección de la flora y la fauna se constituirán de conformidad con las disposiciones de esta Ley, de la Ley General de Vida Silvestre, la Ley de Pesca y demás aplicables, en los lugares que contienen los hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres.

En dichas áreas podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia.

Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habiten en el momento de la expedición de la declaratoria respectiva, o que resulte posible según los estudios que se realicen, el que deberá sujetarse a las normas oficiales mexicanas y usos del suelo que al efecto se establezcan en la propia declaratoria.

C) ADMINISTRACIÓN

De conformidad con los artículos 32 Bis, fracciones I, II, VI y VII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 1, fracciones I, II, III y IV, 5o, fracción VIII, 11, fracción I, 47 de la LGEEPA; 4o, primer párrafo, 5o y 6o del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas y, 67 fracción II, y 77 fracción I, del Reglamento Interior de la SEMARNAT, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de julio de 2022: el establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia federal son competencia de la Federación, y serán administradas directamente por la SEMARNAT, por conducto de la CONANP, quien promoverá la participación de sus habitantes, propietarios o poseedores, gobiernos locales, pueblos y comunidades indígenas y afromexicanas, y demás organizaciones sociales, públicas y privadas, con objeto de propiciar el desarrollo integral de la comunidad y asegurar la protección y preservación de los ecosistemas y su biodiversidad.

Para tal efecto, la SEMARNAT por conducto de la CONANP, podrá suscribir con los interesados los convenios de coordinación con los gobiernos estatales y municipales, y convenios de concertación con ejidos, comunidades agrarias, pueblos y comunidades indígenas y afromexicanas, grupos y organizaciones sociales y empresariales, universidades, centros de educación e investigación y demás personas físicas o morales interesadas.

La administración de las áreas naturales protegidas se efectuará de acuerdo con su categoría de manejo, de conformidad con lo establecido en la LGEEPA, su Reglamento en materia de ANP, el Decreto de creación, las normas oficiales mexicanas, su programa de manejo y demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables, y se deberán adoptar:

- I. Lineamientos, mecanismos institucionales, programas, políticas y acciones destinadas a:
 - a) La conservación, preservación, protección y restauración de los ecosistemas.





b) El uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

c) La inspección y vigilancia.

II. Medidas relacionadas con el financiamiento para su operación.

III. Instrumentos para promover la coordinación entre los distintos niveles de gobierno, así como la concertación de acciones con los sectores público, social y privado.

IV. Acciones tendientes a impulsar la capacitación y formación del personal técnico de apoyo.

Asimismo, en cumplimiento a los artículos 8o y 9o del Reglamento de la LGEEPA en Materia de ANP, la administración y manejo del ANP se efectuará través de un director, que nombre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

D) OPERACIÓN

La operación de la eventual APFF Cenote Aerolito estará a cargo de la Dirección de Área, responsable de coordinar e integrar todas las actividades y recursos humanos y financieros para alcanzar los objetivos de conservación del ANP, mediante una estrategia integral que incluya la protección de los recursos naturales, la restauración de áreas degradadas y su aprovechamiento sustentable, en las que se tendrán las siguientes líneas de trabajo:

Inspección y vigilancia. En coordinación con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), se realizarán acciones para asegurar el cumplimiento de lo dispuesto en el decreto de creación y la correcta ejecución del programa de manejo respectivo, así como las normas aplicables vigentes.

Protección y preservación. Desarrollar actividades de protección en la zona identificada como zona núcleo, misma que debe ser atendida por su prioridad ambiental, así como actividades encaminadas a la protección de especies de fauna emblemática que son indicadoras de la calidad de hábitat para esta región.

Participación social. Establecer y coordinar los mecanismos que permitan la participación de todos los sectores sociales interesados en el ANP, principalmente en la identificación y análisis de problemáticas, en la formulación de propuestas y en el diseño e implementación de acciones en beneficio de las comunidades aledañas, que aseguren la protección y preservación de los ecosistemas y su biodiversidad.

Conocimiento e investigación. Desarrollar, impulsar y coordinar actividades de investigación que realicen instituciones académicas y organizaciones no gubernamentales, tanto nacionales como extranjeras.

Monitoreo. Realizar o coordinar acciones de monitoreo sistemático de los indicadores ecológicos, productivos y sociales que se definan para el ANP.





Educación ambiental. Diseñar y desarrollar un programa de educación ambiental, que incluya los valores ambientales, sociales, culturales y arqueológicos de la región, así como los retos, amenazas y la propuesta para superarlos.

Restauración y repoblación. Identificar las zonas para restauración que presentan indicadores de degradación ambiental y realizar las acciones de recuperación correspondientes, como obras de conservación de suelos en las áreas que presenten altos índices de degradación y actividades de repoblamiento de especies, para los casos en que sea necesario.

Aprovechamiento. Aprovechar de forma ordenada y sustentable; para ello, la Dirección deberá elaborar un registro de usuarios del ANP. Definir, en coordinación con las autoridades correspondientes, el establecimiento de políticas de aprovechamiento con fines de turismo de bajo impacto ambiental compatibles con la conservación de los recursos y especialmente con la conservación del hábitat y especies protegidas que se distribuyen en la zona, promoviendo el uso de tecnologías para la protección de los ecosistemas y evitar aquellas que los alteren.

Asimismo, el Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024 señala objetivos con diversas estrategias y líneas de acción para un manejo eficiente de las áreas que serán consideradas para la operación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito (CONANP, 2020b) (Tabla 19):

Tabla 19. Objetivos y estrategias para un manejo efectivo de las ANP de carácter federal.

1. Manejo Efectivo de las ANP	
Objetivo	Estrategias
Fortalecer el manejo efectivo de las ANP e impulsar el incremento de la superficie de conservación para mantener la representatividad de la biodiversidad, la conectividad y funcionalidad de los ecosistemas y la provisión de sus servicios ambientales para el mejoramiento de la calidad de vida de las actuales y futuras generaciones	1.1. Evaluar y fortalecer el Manejo Efectivo de las ANP terrestres y marinas. 1.2. Incrementar la superficie protegida a través de ANP y otras modalidades de conservación. 1.3. Fomentar el enfoque de manejo integrado del paisaje (MIP) y la conectividad ecológica. 1.4. Fomentar y fortalecer mecanismos de participación social y gobernanza en ANP. 1.5.- Promover la generación y difusión de conocimiento para la conservación y el manejo efectivo de las ANP.
2. Participación comunitaria	
Objetivo	Estrategias
Impulsar la participación comunitaria en la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en las ANP para mejorar sus medios de vida y reducir su vulnerabilidad.	2.1. Fomentar proyectos y emprendimientos productivos sustentables que fortalezcan a las comunidades locales y disminuyan su vulnerabilidad en ANP y zonas de influencia. 2.2. Impulsar acciones de restauración con fines productivos en ANP y zonas de influencia. 2.3. Coadyuvar en las medidas para la prevención de contingencias y gestión comunitaria de riesgos en las Áreas Naturales Protegidas y zonas de influencia y promoviendo soluciones naturales basadas en ecosistemas.





3. Restauración ecológica y conservación de especies prioritarias y su hábitat	
Objetivo	Estrategias
Promover la restauración de ecosistemas, así como acciones de protección y monitoreo para la conservación y recuperación de especies prioritarias y sus hábitats en las ANP y zonas de influencia.	3.1. Promover la restauración de ecosistemas terrestres, insulares, marinos y de agua dulce, considerando el contexto del cambio climático. 3.2. Impulsar la protección y conservación de especies prioritarias y de interés y sus hábitats.
4. Gestión efectiva institucional	
Objetivo	Estrategias
Fortalecer las capacidades institucionales para el logro de los objetivos sustantivos de la CONANP, optimizando la coordinación y articulación intra e interinstitucional con otras dependencias y actores involucrados con las Áreas Naturales Protegidas y fomentando y fortaleciendo la participación y cooperación internacional.	4.1 Fortalecer las capacidades institucionales para el manejo efectivo de las ANP. 4.2 Fortalecer a las ANP como soluciones naturales para el Cambio Climático (adaptación y mitigación). 4.3 Optimizar la coordinación y articulación interinstitucional para lograr el cumplimiento del PNANP. 4.4 Fomentar y fortalecer la participación y la cooperación internacional en materia de conservación.

E) FINANCIAMIENTO

El financiamiento para la operación de la propuesta de APFF Cenote Aerolito provendrá de recursos fiscales aportados por el Gobierno Federal a través de la CONANP. Adicionalmente se diseñarán los mecanismos para el financiamiento de la eventual ANP mediante estrategias e instrumentos que permitan asegurar su sustentabilidad económica, la identificación y gestión de fuentes alternativas de recursos económicos.

Dentro de las fuentes de financiamiento interno y externo destacan, de manera enunciativa más no limitativa, las siguientes:

- Recaudación y administración de fondos adicionales a los recursos fiscales con que contará el ANP.
- Cobro de derechos por el uso y disfrute del ANP.
- Aportaciones de organismos financieros internacionales.
- Donaciones privadas y de fundaciones nacionales e internacionales a través de asociaciones civiles.
- Fideicomisos locales y regionales de apoyo a las Áreas Naturales Protegidas.
- Aportaciones en especie por parte de fundaciones, instituciones académicas o personas físicas (realización de estudios e investigaciones, acciones de monitoreo, equipo e infraestructura, entre otras).

Asimismo, con el objeto de asegurar el uso sustentable de los recursos y cumplir con los objetivos del ANP, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales podrá diseñar y aplicar los instrumentos económicos establecidos en la LGEEPA enfocados a promover el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales de la eventual APFF Cenote Aerolito.





V. BIBLIOGRAFÍA

ACOEZ. 2023. Ecología y voluntarios realizan el saneamiento del cenote “aerolito” por el día mundial del agua. Subdirección de Ecología. Ayuntamiento de Cozumel 2021-2024. Disponible desde: <https://cozumel.gob.mx/prensa/ecologia-y-voluntarios-realizan-el-saneamiento-del-cenote-aerolito-por-el-dia-mundial-del-agua/>. Fecha de consulta: 20 de abril de 2023.

Aguilar, V. 2003. Aguas continentales y diversidad biológica de México: un recuento actual. *Biodiversitas*, 48 (8). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp: 1-14.

Aguirre-Muñoz, A., J. E. Bezaury-Creel, H. de la Cueva, I.J. March-Mifsut, E. Peters-Recagno, S. Rojas-González de Castilla y K. Santos-del Prado Gasca. 2010. Islas de México. Un recurso estratégico. Instituto Nacional de Ecología, The Nature Conservancy, Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A. C., Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México. 52 pp.

Álvarez-Legorreta, T. 2011. Uso y manejo de recursos hídricos. *En*: Pozo, C., N. Armijo-Canto y S. Calmé (Eds). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp. 121-126.

Arizmendi, M. del C. y H. Berlanga. 1996. Áreas de importancia para la conservación de las aves en México. Gaceta ecológica INE-SEMARNAP. México.

Arizmendi, M. del C. y L. Márquez. (Eds.). 2000. Áreas de importancia para la conservación de las aves en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 440 p.

Arriaga, L., V. Aguilar y J. Alcocer. 2002. Aguas continentales y diversidad biológica de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Barba-Macías, E. y J. G., Palacios-Vargas, 1998. Fauna acuática cavernícola de la península de Yucatán. *Mundos subterráneos*. Núm. 9. pp. 31-42.

Berlanga, H., H., Gómez de Silva, V. M., Vargas-Canales, V., Rodríguez-Contreras, L. A., Sánchez-González, R., Ortega-Álvarez y R., Calderón-Parra. 2019. Aves de México: Lista actualizada de especies y nombres comunes. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Berlanga, H., V. Rodríguez-Contreras, A. Oliveras de Ita, M. Escobar, L. Rodríguez, J. Vieyra y V. Vargas. 2022. Red de Conocimientos sobre las Aves de México (AVESMX). CONABIO. Disponible en: <http://avesmx.conabio.gob.mx/Inicio.html>. Fecha de consulta: 16 de abril de 2023.

Bienestar. 2019. Catálogo de localidades indígenas A y B 2020. Secretaría de Bienestar. Disponible en: <https://www.gob.mx/bienestar/documentos/catalogo-de-localidades-indigenas-a-y-b-2020>. Fecha de consulta: 25 de abril de 2023.

Brankovits, D., S. N., Little, T. S., Winkler, A. E., Tamalavage, L. M., Mejía-Ortíz, C. R., Maupin, G., Yáñez-Mendoza y P. J., Van Hengstum. 2021. Changes in organic matter sedimentation impact benthic meiofaunal communities in the marine sector of karst subterranean estuaries. *Frontiers in Environmental Sciences*. 9:670914





- Bribiesca-Contreras, G., Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A. y Zaldívar-Riverón, A. 2013. Identification of echinoderms (Echinodermata) from an anchialine cave in Cozumel Island, Mexico, using DNA barcodes. *Molecular Ecology Resources* 13(6): 1137–1145.
- Bribiesca-Contreras, G., Pineda-Enríquez, T., Márquez-Borrás, F., Solís-Marín, F. A., Verbruggen, H., Hugall, A. F. y O'Hara, T. 2019. Dark offshoot: phylogenomic data sheds light on the evolutionary history of a new species of cave brittle star. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 136: 151–163.
- Calderón-Gutiérrez, F. y C. A. Sánchez-Ortiz. 2012. Ecological base line establishment in the El Aerolito Anchialine System. *National Croatian*, 21(Suppl) 1-20.
- Calderón-Gutiérrez, F., G. Bribiesca-Contreras y F. A. Solís-Marín. 2012. The Aerolito de Paraiso-Anchialine System: Paradise for Echinoderms. *National Croatia* 21(Suppl) 1-20.
- Calderón-Gutiérrez, F. 2013. Riqueza taxonómica y línea base ecológica de los macroinvertebrados bentónicos troglobiontes del sistema cavernícola anchialino “El Aerolito”, isla Cozumel, Quintana Roo, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 72 p.
- Calderón-Gutiérrez, F., Solís-Marín, F. A. y Sánchez-Ortiz, C. A. 2014. Anchialine Ecosystem El Aerolito (Cozumel, Mexico): Paradise of Cave Dweller Echinoderms. *En: Whitmore, E. (Ed). Echinoderms Ecology, Habitats and Reproductive Biology*. New York, Nova Science Publisher.
- Calderón-Gutiérrez, F., F. A., Solís-Marín, P., Gómez, C., Sánchez, P., Hernández-Alcántara, F., Álvarez-Noguera y G., Yáñez-Mendoza. 2017. Mexican anchialine fauna - With emphasis in the high biodiversity cave El Aerolito. *Regional Studies in Marine Science*. Volume 9, January 2017. pp. 43-55.
- Calderón-Gutiérrez, F., C. A., Sánchez-Ortiz y L., Huato-Soberanis. 2018. Ecological patterns in anchialine caves. *PlosOne* 13(11): e202909.
- Calmé, S., C., Pozo y N., Armijo. 2011. Desafíos para la conservación de la biodiversidad en Quintana Roo. *En: Pozo, C., N. Armijo-Canto y S. Calmé (Eds). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp. 336-344.
- Carballo, J. L., P. Gómez y J. A. Cruz-Barraza. 2014. Biodiversidad de Porífera en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. México 85: S143-S153, 2014.
- Cardillo, M., A. Purvis, W., Sechrest, J. L. Gittleman, J., Bielby y G. M., Mace. 2004. Human population density and extinction risk in the world's carnivores. *PLoS biology*. 2004 Jul 13; 2(7):e197
- Carrillo-Fajardo, N., T., Jacinto-Serrano, J., Reynoso-Chimal, C., Tuz-Peraza, R., Uc-Tescum, S., Reyes-Carrillo y J., Rojas. 2011. Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel. Secretaría de Desarrollo Social. Programa de Prevención de Riesgos en los asentamientos humanos. 159 p.
- Castillo-Rodríguez, Z. 2014. Biodiversidad de moluscos marinos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. México 85: S419-S430, 2014.
- Ceballos, G. y G. Oliva. 2005. Los Mamíferos Silvestres de México. CONABIO-Fondo de Cultura Económica. México, D. F.





CENAPRED. 2016. Índice de Peligro por Inundación (IPI). Centro Nacional de Prevención de Desastres. Subdirección de Riesgos por Inundación. Disponible en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Metodologias/Inundacion.pdf>. Fecha de consulta: 12 de abril de 2023.

CENAPRED. 2021. Información básica de peligros naturales a nivel municipal. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. Disponible desde: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/info_basica_municipal.html. Fecha de consulta: 2 de mayo de 2023.

CENAPRED. 2022. Base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. Disponible en: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Impactos_Base_Histo_Anual_Publica_2000_2020.xlsx. Fecha de consulta: 12 de abril de 2023.

Cervantes-Martínez, A. 2007. Estudios limnológicos de sistemas cársticos (Cenotes). *En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 349-359.*

Challenger, A. y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres. *En: Soberón, J., G. Halfter y J. Llorente-Bousquets (Comps.). Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 87-108.*

Chesser, R. T., S. M. Billerman, K. J. Burns, C. Cicero, J. L. Dunn, B. E. Hernández-Baños, R. A. Jiménez, A. W. Kratter, N. A. Mason, P. C. Rasmussen, J. V. Remsen, Jr., D. F. Stotz, and K. Winker. 2022. Check-list of North American Birds. American Ornithological Society. Disponible en: <https://checklist.aou.org/taxa>. Fecha de consulta: 6 de mayo de 2023.

CICC. 2017. Estrategia Nacional para REDD+ 2017-2030. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Comisión Nacional Forestal. Disponible en: <http://www.enaredd.gob.mx/wp-content/uploads/2017/09/Estrategia-Nacional-REDD+-2017-2030.pdf>. Fecha de consulta: 12 de abril de 2023.

Clements, J. F., T. S. Schulenberg, M. J. Iliff, T. A. Fredericks, J. A. Gerbracht, D. Lepage, S. M. Billerman, B. L. Sullivan y C. L. Wood. 2022. The eBird/Clements checklist of Birds of the World: v2022. Disponible en: <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>. Fecha de consulta: 14 de mayo de 2023.

Climate Central. 2023. Sea level tools and análisis. Climate Central. Disponible en: https://ss2.climatecentral.org/#8/19.552/-91.198?show=satellite&projections=0-K14_RCP85-SLR&level=2&unit=meters&pois=hide. Fecha de consulta: 22 de abril de 2023.

CMNUCC. 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio climático. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2023.

CONABIO. 1997. Provincias biogeográficas de México. Escala 1:4000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.





CONABIO. 2015. Isla Cozumel. Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: http://avesmx.conabio.gob.mx/FichaRegion.html#AICA_178. Fecha de consulta: 20 de abril de 2023.

CONABIO. 2020a. Islas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/islas>. Fecha de consulta: 25 de abril de 2023.

CONABIO. 2020b. Islas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible desde: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/islas>. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2023. México.

CONABIO. 2020c. Sistema de Información sobre especies Invasoras. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras> Fecha de consulta: 03 de mayo de 2022.

CONABIO. 2021a. Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad acuática epicontinental. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible desde: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/planeacion-para-la-conservacion/sitiosp-acuatica-epicontinental>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

CONABIO. 2022a. Arrecifes. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes>. Fecha de consulta: 23 de junio de 2022. México.

CONABIO. 2022b. Especies endémicas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible desde: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/endemicas>. Fecha de consulta: 26 de abril de 2023. México.

CONABIO. 2022c. Regiones hidrológicas prioritarias. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible desde: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/regiones-hidrologicas-prioritarias-de-mexico>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2023.

CONABIO. 2022d. Ecosistemas de México. Ríos y lagos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible desde: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>. Fecha de consulta: 20 de febrero de 2023.

CONABIO. 2022e. Aves de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/aves-de-mexico>. Fecha de consulta: 26 de abril de 2023. México.

CONABIO. 2022f. Ecorregiones terrestres. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/ecorregiones.html> Fecha de consulta: 18 de abril de 2022.

CONABIO. 2023a. SNIB. Base de Datos Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

CONABIO. 2023b. Catálogo de autoridades taxonómicas de especies de flora y fauna con distribución en México. Base de datos SNIB-CONABIO. México.





CONABIO y CONANP. 2010. Vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad acuática epicontinental de México: cuerpos de agua, ríos y humedales. Escala: 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.

CONAFOR. 2017. Bosques y Cambio Climático. Comisión Nacional Forestal. Disponible en <https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-cambio-climatico-23762>. Fecha de consulta: 24 de marzo de 2023.

CONAGUA. 2020. Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Cozumel (2305) en el estado de Quintana Roo. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. Diciembre 2020.

CONANP. 2007. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área de Protección de Flora y Fauna Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 130 p.

CONANP. 2015. Estrategia de Cambio Climático desde las Áreas Naturales Protegidas: Una Convocatoria para la Resiliencia de México (2015-2020). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 61 p.

CONANP-SEMARNAT. 2017. La importancia del carbono azul. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 3 p.

CONANP. 2020a. Evaluación de la Efectividad de Manejo o de Gestión. Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/efectividad.php>. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2023.

CONANP. 2020b. Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020 – 2024. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 58 p.

CONANP. 2022a. Los humedales y la Convención Ramsar. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible desde: <https://ramsar.conanp.gob.mx/>. Fecha de consulta: 15 de abril de 2023.

CONANP 2022b. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida Área de Protección de Flora y Fauna Jaguar. Quintana Roo, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 236 p.

CONANP-GIZ. 2017. Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y Área de Protección de Flora y Fauna Isla Cozumel. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit. Proyecto de Valoración de Servicios Ecosistémicos de Áreas Naturales Protegidas Federales de México: una herramienta innovadora para el financiamiento de biodiversidad y cambio climático (EcoValor MX). Ciudad de México, 2017. 90 p.

CONANP-PNUD. 2019. Resiliencia. Áreas Naturales Protegidas: Soluciones naturales a retos globales. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México.





CONANP-SEMARNAT. 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. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 248 p.

CONAPO. 2020. Índice de marginación (carencias poblacionales) por localidad, municipio y entidad. Disponible desde: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indice-de-marginacion-carencias-poblacionales-por-localidad-municipio-y-entidad>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

CONEVAL. 2019. Metodología para la medición multidimensional de la pobreza en México. Tercera edición. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 142 pp. Disponible desde: <https://www.coneval.org.mx/InformesPublicaciones/InformesPublicaciones/Documents/Metodologia-medicion-multidimensional-3er-edicion.pdf>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

CONEVAL. 2021. Medición de la pobreza. Índice de Rezago Social 2020 a nivel nacional, estatal, municipal y localidad. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Disponible desde: https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice_Rezago_Social_2020.aspx. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

Côté, I. M. y Darling, E. S. 2010. Rethinking Ecosystem Resilience in the Face of Climate Change. *PLoS Biol* 8(7): e1000438.

Coutino, A., Stastna, M., y Reinhardt, E. G. 2020. Interaction of Mangrove Surface Coverage and Groundwater Inputs on the Temperature and Water Level Near Tulum, Quintana Roo, Mexico: Observations and Modelling. *J. Hydrol.* 583.

Cowardin, L. M., Carter, V., Goulet, F. C. y Laroe, E. T. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. (Informe No. FWS/ OBS-79/31) Washington, D. C. U. S. Department of the Interior, U. S. Fish and Wildlife Service y Office of Biological Services.

Daehler, C. C. 2001. Two ways to be an invader, but one is more suitable for ecology. *Bulletin of the Ecological Society of America* 82 (1):101-102.

DATATUR. 2023. El PIB Turístico Estatal y Municipal 2018-2019. Edición 2018-2020. Sistema Nacional de Información Estadística del Sector Turismo de México. Secretaría de Turismo. Disponible en: <https://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages/PibTuristicoEstatalMunicipal.aspx>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

DGCS-UNAM. 2013. Peligra la cueva “el aerolito”, donde se descubrió la primera estrella de mar cavernícola del mundo. Boletín UNAM-DGCS-241. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible desde: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013_241.html. Fecha de consulta: 23 de abril de 2023.

DGRU. 2023. Portal de Datos Abiertos UNAM, Colecciones Universitarias. Dirección General de Repositorios Universitarios, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://datosabiertos.unam.mx/>. Fecha de consulta: 19 de mayo de 2023.





Di Minin, E., Slotow, R., Hunter, L. T., Pouzols, F. M., Toivonen, y T, Verburg. Global priorities for national carnivore conservation under land use change. *Scientific Reports*. 2016 Apr 1; 6:23814. <https://doi.org/10.1038/srep23814> PMID: 27034197.

DOF. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 8 de mayo de 2023.

DOF. 1992. Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 8 de mayo de 2023.

DOF. 1996. Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Arrecifes de Cozumel, ubicada frente a las costas del Municipio de Cozumel, Estado de Quintana Roo, con una superficie de 11,987-87-50 hectáreas. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 19 de julio de 1996.

DOF. 2000. Reglamento de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 21 de mayo de 2014.

DOF. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010: Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 30 de diciembre de 2010.

DOF. 2012a. DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Área de protección de flora y fauna, la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel, Municipio de Cozumel, Estado de Quintana Roo. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 25 de septiembre de 2012.

DOF. 2012b. Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 11 de mayo de 2022.

DOF. 2021. PROGRAMA Especial de Cambio Climático 2021-2024. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 8 de noviembre de 2021.

DOF. 2014. ACUERDO por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicado el 5 de marzo de 2014.

DOF. 2016. ACUERDO por el que se determina la Lista de las Especies Exóticas Invasoras para México. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicado el 7 de diciembre de 2016.

DOF. 2019. MODIFICACIÓN del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 30 de diciembre de 2010.

Drake, D. R., C. P. H., Mulder, D. R., Towns y C. H., Daugherty. 2002. The biology of insularity: an introduction. *Journal of Biogeography* 29: 563-569.





Ek, D. A. 2011. Vegetación. *En*: Pozo, C., N. Armijo-Canto y S. Calmé (Eds). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México.

EPA. 2021. Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature. United States Environmental Protection Agency. Disponible en: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature>. Fecha de consulta: 27 de abril de 2023.

Espinosa, O. D. y S. Ocegueda. 2008. El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. *En*: Soberón, J., G. Halfter y J. Llorente-Bousquets (Comps.). Capital Natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 33-65.

Everard, M., Johnston, P., Santillo, D. y Staddon, C. 2020. The role of ecosystems in mitigation and management of COVID-19 and other zoonoses. *Environmental Science and Policy*, 111: 7-17.

Flores, J. S. 1992. Vegetación de las islas de la Península de Yucatán. Florística y etnobotánica. *En*: Flores, J. S. (Ed.). *Etnoflora Yucatanense*. Fascículo 4. Universidad Autónoma de Yucatán. México.

Flores-Villela, O. y García-Vázquez, U. O. 2014. Biodiversity of reptiles in Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, S467-S475.

FONATUR. 2018. Proyecto Hotel Boutique Cozumel II. Manifestación de Impacto Ambiental. Marina FONATUR Cozumel. Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 34 p.

FONATUR. 2020. Cozumel, una isla rodeada de mundo. Fondo Nacional de Fomento al Turismo. Disponible en: <https://www.gob.mx/fonatur/acciones-y-programas/cozumel-una-isla-rodeada-de-mundo>. Fecha de consulta: 27 de abril de 2023.

FONATUR. 2021. Proyecto Villa Corales. Manifestación de Impacto Ambiental. Marina FONATUR Cozumel. Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 195 p.

Frausto, O. 2019. Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México. Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst A.C.-Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística-Universidad de Quintana Roo. México.

Froese, R. y D. Pauly. 2022. FishBase. World Wide Web electronic publication. Disponible en: <https://www.fishbase.se/search.php>. Fecha de consulta: 2 de mayo de 2023.

Frontana-Uribe, S. C. y V. Solís-Weiss. 2011. First records of polychaetous annelids from Cenote Aerolito (sinkhole and anchialine cave) in Cozumel Island, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 73, no. 1, p. 1-10.

Frost, D. R. 2023. Amphibian Species of the World: an Online Reference. Version 6.1 American Museum of Natural History, New York, USA. Disponible en: <https://amphibiansoftheworld.amnh.org/index.php>. Fecha de consulta: 2 de mayo de 2023.





García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana (5ª ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

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

GBIF. 2023. Global Biodiversity Information Facility Home Page. Disponible en: <https://www.gbif.org>. Fecha de consulta: 2 de mayo de 2023.

QROO, 2013. Ley de Acción de Cambio Climático en el Estado de Quintana Roo. Periódico Oficial del Estado. Publicada el 30 de abril de 2013.

QROO, 2022. Sexto Informe de Gobierno 2021-2022: Anexo Estadístico. Gobierno del Estado de Quintana Roo. Disponible en: <http://www.sefiplan.groo.gob.mx/coplade/informesn.php>. Fecha de consulta: 18 de abril de 2023.

QROO, INECC-AECID y UQROO. 2013. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Quintana Roo (PEACCQROO). Gobierno del Estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. Universidad de Quintana Roo. México. 116 p.

González-Baca, C. A. 2006. Ecología de forrajeo de la boa (*Boa constrictor*), un depredador introducido a la Isla Cozumel. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

González-Ocampo H. A., P. Cortés-Calva, L.I. Íñiguez Dávalos, A. Ortega-Rubio. 2014. Las áreas naturales protegidas de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 60, 7-15.

Gómez, P. F., Calderón-Gutiérrez, C., González-Gándara y M. A., Rojas-Terán. 2021. New species of *Microscleroderma* and *Amphipleptula* (Demospongiae, Tetractinellida, Scleritodermidae) from two contrasting marine environments. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1-11.

Gutiérrez-Aguirre, M. A., A., Cervantes-Martínez, O., Frausto-Martínez, W. D., Uhu-Yam, V. H., Delgado-Blas y J. D., Ruiz-Ramírez. 2018. Revisión de las especies endémicas de poliquetos, crustáceos y peces del Acuífero Norte de Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*. Núm. 25. mayo-agosto. 2018. Pp. 90-114.

Hernández-Díaz, Y., Q.; F. A., Solís-Marín, N., Simões y L., Sanvicente-Añorve. 2013. First record of *Ophioderma ensiferum* (Echinodermata: Ophiuroidea) from the southeastern continental shelf of the Gulf of Mexico and from an anchialine cave. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84: 676-681, 2013.

Hernández-Gallegos, O., A., López-Moreno, J. F., Méndez-Sánchez, J. L., Rheubert y F., Méndez-de la Cruz. 2015. Ámbito hogareño de *Aspidoscelis cozumela* (Squamata, Teiidae): una lagartija partenogenética microendémica de Isla Cozumel, México. *Rev. Biol. Trop.* vol.63 n.3 San José Jul./Sep. 2015.





Holthuis, L. B. 1973. Caridean shrimps found in land-locked saltwater pools at four Indo-West Pacific localities (Sinai Peninsula, Funafuti Atoll, Maui, and Hawaiian Islands), with the description of one new genus and four new species. *Zoologische Verhandelingen* 128: 1-48.

INE-SEMARNAP. 1998. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 166 p.

INECC. 2019. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Ed. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. 226 p. INEGI. 2015. Catálogo del Territorio Insular Mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 243 pp.

INEGI-CONABIO-INE. 2008. Ecorregiones terrestres de México. Escala 1:1,000,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad e Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Fecha de consulta: 18 de abril de 2023. México.

INEGI. 2015. Conjunto de datos del Territorio Insular Mexicano. Escala 1:50 000. Versión 2. 2013. INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020.

INEGI. 2016. Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI. 2020. Red Nacional de Caminos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://rnc.imt.mx/>. Fecha de consulta: 16 de abril de 2023.

INEGI. 2021. Censo Nacional de Población y Vivienda, 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Tabulados>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

INEGI, 2022a. Marco Geoestadístico, diciembre 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>. Fecha de consulta: 16 de abril de 2023.

INEGI. 2022b. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>. Fecha de consulta: 18 de abril de 2023.

IPBES. 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *En*: S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p.

IPCC. 2021. Summary for Policymakers. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). *En*: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group





I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Fecha de consulta 26 de abril 2023.

ITIS. 2022. On-line database. Integrated Taxonomic Information System. Disponible en: www.itis.gov. Fecha de consulta: 3 de mayo de 2023.

Kensley, B. 1988. New species and records of cave shrimps from the Yucatan Peninsula (Decapoda: Agostocaridae and Hippolytidae). *Journal of Crustacean Biology* 8(4): 688-699.

Lara-Lara, J. R., J. A., Arreola, L. E., Calderón, V. F., Camacho, V. F., Camacho, G. de la Lanza; A. E., Giansone, M., Espejel, M. G., Arroyo, L., Ladah, M., López, E. A., Meling, P., Moreno, H. Reyes-Bonilla, E. Ríos y J. A. Zertuche. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *En: Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 109-134.*

Lepage, D. y J. Warnier. 2014. The Peters' Check-list of the Birds of the World (1931-1987). Base de datos desde Avibase, the World Database. Disponible en: <https://avibase.bsc-eoc.org/peterschecklist.jsp>. Fecha de consulta: 3 de mayo de 2023.

Lhumeau, A. y Cordero, D. 2012. Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al cambio climático. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Quito, Ecuador. 17 p.

Lira-Noriega, A., V. Aguilar, J. Alarcón, M. Kolb, T. Urquiza-Haas, L. González-Ramírez, W. Tobón y P. Koleff. 2015. Conservation planning for freshwater ecosystems in Mexico. *Biological Conservation*, 191, 357-366.

Llorente-Bousquets, J., y S. Ocegueda. 2008. Estado del conocimiento de la biota. *En: Capital natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 283-322.*

Locatelli, B. 2016. Ecosystem Services and Climate Change. *En: M. Potschin, R. Haines-Young, R. Fish y R. K. Turner (Eds.). Routledge Handbook of Ecosystem Services. Routledge, London y Nueva York. pp. 481-490.*

Lot, H. A. y P. Ramírez-García. 2007. Vegetación. *En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 115-120.*

Lowe, S., M. Browne., S. Boudjelas y M. De Poorter. 2004. 100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database. Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza.

Manríquez-Moran, N. y F., Méndez-de la Cruz. 2008. Homogeneidad genética entre dos poblaciones de la lagartija partenogenética *Aspidoscelis cozumela*. *Rev. Mex. Biodiv. [online]. 2008, vol.79, n.2, pp.421-426. ISSN 2007-8706.*





- Mansourian, S., Belokurov, A. y Stephenson, P. J. 2009. The role of forest protected areas in adaptation to climate change. *Unasylva*, 60: 63–69.
- March, I. J., Cabral, H., Echeverría, Y., Bellot, M. y J. M. Frausto. 2011. Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México. Serie Estrategias de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas de México. No. 1. 109 pp.
- Márquez-Borrás, F., F. A. Solís-Marín y L. M. Mejía-Ortíz. 2020. Troglomorphism in the brittle star *Ophioneis commutabilis* Bribiesca-Contreras et al., 2019 (Echinodermata, Ophiuroidea, Ophioneididae). *Subterranean Biology* 33:87-108.
- Martínez-Morales, M. y A. D. Cuarón. 1999. *Boa constrictor*, an introduced predator threatening the endemic fauna on Cozumel Island, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 8: 957-963
- Mejía-Ortíz, L. M., G. Yañez, y M. López-Mejía. 2006. Fauna of five anchialine caves in Cozumel Island, México. *The National Association for Cave Diving Journal*, 39: 11-15.
- Mejía-Ortíz, L. M., G. Yañez-Mendoza, López-Mejía, M. y Zarza, E. 2007a. Cenotes from Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68(2) 250- 255.
- Mejía-Ortíz, L. M., G., Yañez-Mendoza y López-Mejía, M. 2007b. Echinoderms in an anchialine cave in Mexico. *Marine Ecology* 2007, 28 (Suppl. 1), 31–34.
- Mejía-Ortíz, L. M., M. López-Mejía y A. V. Muñoz-Gómez. 2007c. Crustáceos decápodos. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 225-238.
- Mejía-Ortíz L. M., M. López-Mejía, G. Bribiesca-Contreras, F.A. Solís-Marín y G. Yañez-Mendoza. 2013a. La faune anchialine de l'île de Cozumel 140-155 En: Thomas C., Les grottes du Yucatan: Ile de Cozumel. Editions Xibalba. Montreuil.
- Mejía-Ortíz L. M., M. López-Mejía, J. Pakes, R. Hartnoll y E. Zarza-González. 2013b Morphological adaptations to anchialine species of five shrimp species (*Barbouria yanezi*, *Agostocaris bozanici*, *Procaris mexicana* *Calliasmata nohochi* and *Typhlatya pearsei*). *Crustaceana* 86(5): 578-593.
- Mejía-Ortíz, L. M., A. L., Collantes-Chávez-Costa, C., López-Contreras y O., Frausto-Martínez. 2022. Subterranean waters in Riviera Maya of the Yucatan Peninsula: Vulnerability and the Importance of Monitoring. En: Massarelli, C. y C. Campanale. (Eds.) 2023. Limnology - The Importance of Monitoring and Correlations of Lentic and Lotic Waters. pp. 1-16.
- Mendoza, M. A. 2011. Variabilidad y estructura genética del murciélago zapotero *Artibeus jamaicensis* en tres tipos de vegetación de la isla Cozumel. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 68 p.





Miranda, F. y Hernández-X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad de Botánica de México*. 28: 29-176.

Morales-Contreras, J., M. A., Martínez-Morales y U. Márquez-Luna. 2020. Recursos florales usados por el colibrí esmeralda de Cozumel (*Chlorostilbon forficatus*). *Huitzil, Rev. Mex. Ornitol.* Vol. 21. Núm. 1: e-589 (enero-junio 2020).

Morales-Contreras, J., M. A., Martínez-Morales, A. D., Cuáron y L. B., Vázquez. 2022. Population trends and viability of the critically endangered Cozumel Curassow: a 25-year perspective. *Écoscience*, DOI: 10.1080/11956860.2022.2121065

Montero, G. I. 1999. Taxonomía cultural subterránea. *El Guácharo*. Núm. 45, pp. 43-52, Boletín divulgativo de la Sociedad Venezolana de Espeleología, Caracas, Venezuela.

Montero, G. I. 2002. Las cavernas a través de la historia de México. *Mundos Subterráneos*. Núm. 13. *Revista de la Unión Mexicana de Agrupaciones Espeleológicas, A. C.*, México, D. F. pp. 16-26.

Montero, G. I. 2013. El sello del Sol en Chichén Itzá. Fundación Armella Spitalier. México.

Montero, G. I. 2020. Cocotzin: Nuestra Señora de Los Remedios, ITiO Ediciones y Universidad del Tepeyac, Ciudad de México. México.

NASA. 2018. Global Climate Change. Vital Signs if the Planet. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level//>. Fecha de consulta 26 de abril 2023.

NASA. 2023. The NASA Sea Level Projection Tool. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>. Fecha de consulta 26 de abril 2023.

Navarro-Sigüenza, A., M. F. Rebón-Gallardo, A. Gordillo-Martínez, A. Townsend, H. Berlanga-García y L. A. Sánchez-González. 2014. Biodiversidad de aves en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. México 85: S476-S495, 2014.

NOAA. 2022. Historical hurricane tracks. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80>. Fecha de consulta 26 de abril 2023.

Okolodkov, Y. B. 2010. Biogeografía Marina. Universidad Autónoma de Campeche. México. 217 pp.

Pacheco, M. A. y F. J. Vega. 2007. Reseña geológica. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 33-43.

Palafox-Muñoz, A y A., Gutiérrez-Torres. 2013. Cambio climático y desarrollo turístico. Efecto de los huracanes en Cozumel, Quintana Roo y San Blas, Nayarit. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 58: 44-54.





Palafox-Muñoz, A., J. S. Anaya Ortiz, H. A. Ken Sánchez y S. N. Aguilar García. 2017. Turismo y biodiversidad: una mirada crítica. *En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 383-392.*

Pimentel, D., Zúñiga, R. y D. Morrison. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics. 52: 273-288.*

Pliego-Sánchez, J. V., C. Blair, A. D. Vega-Pérez y V. H. Jiménez-Arcos. 2021. The insular herpetofauna of Mexico: Composition, conservation, and biogeographic patterns. *Ecology and Evolution. 11: 6579–6592.*

PNAC. 2019. Situación de los Arrecifes en Cozumel. Reporte Técnico. Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Departamento de Monitoreo Ambiental y Vinculación Académica. 17 p.

PNUD-INECC. 2016. Metodología y descripción de las 35 islas de México estudiadas para evaluar el impacto del aumento del nivel del mar. Evaluación de impactos del cambio climático (por elevación del nivel del mar 1m, 2m y 5m) sobre línea costera, ecosistemas y especies, así como población en las islas de México. Informe Final. Autor y responsable técnico: Alfonso Aguirre Muñoz. Seguimiento técnico por INECC: Karina Santos y José Machorro Reyes. Elaborado en el marco del proyecto #86487 "Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México", Coordinador: Alejandro Monterroso Rivas. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ciudad de México. 108p.

POEQroo. 2008. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) del Municipio de Cozumel, Quintana Roo. Publicado el 21 de octubre de 2008.

POEQroo. 2022. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. Plan Municipal de Desarrollo de Cozumel, Quintana Roo 2021-2024. Ayuntamiento de Cozumel. Tomo I. Número 34 Extraordinario. Novena Época. Publicado el 26 de febrero de 2022. Disponible en: <https://cozumel.gob.mx/wp-content/uploads/2022/04/Plan-Municipal-de-Desarrollo-de-Cozumel-2021-2024.pdf>.

Pozo, C., N. Salas y A. Maya. Mariposas. 2011. *En: Pozo, C. (ed). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp. 186-196.*

Ramírez-Pulido, J., N. González-Ruiz, A. Gardner y J. Arroyo-Cabrales. 2014. List of recent land mammals of Mexico. Special Publications. Museum of Texas Tech University. Natural Science Research Laboratory. 63: 1-69.

Revels-González, M. B. 2007. Conectividad entre áreas marinas protegidas. *En: Halffter, G. y A. Melic (Eds.). 2007. Hacia una cultura de conservación de la diversidad biológica. Monografías Tercer Milenio vol. 6, S.E.A., Zaragoza, España. ISBN: 978-84-935872-0-8. 15 diciembre 2007. pp: 311–316.*

Rincón, S. M. 2013. Descripción de secuencias de ecolocación y determinación del uso de hábitat de murciélagos insectívoros aéreos en hábitats representativos de Cozumel, Quintana-Roo, México. Tesis





de licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México. 102 p.

Romero-Nájera, I. 2004. Distribución, abundancia y uso de hábitat de *Boa constrictor* introducida a la Isla Cozumel. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Ruíz-Cancino, G., Mejía-Ortíz, L. M. y Yáñez-Mendoza, G. 2019. La biodiversidad oculta en los cenotes de la isla de Cozumel. *Ciencia y Desarrollo*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. pp. 1-13.

SADER-SEMARNAT. 2021. Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Sustentable de los Polinizadores (ENCUSP). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Sale, P. 2006. Connectivity: what it is, how to Measure it, why it is important for management. *En: Proceedings of the 59° Gulf and Caribbean Fisheries Institute Conference*. Belize City, 6-11 November, 2006.

Sánchez-Cordero, V., F. Botello, J. J. Flores-Martínez, R. A. Gómez-Rodríguez, L. Guevara, G. Gutiérrez-Granados y A. Rodríguez-Moreno. 2014. Biodiversidad de Chordata (Mammalia) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85: S496-S504, 2014. México.

Schmitter-Soto, J. J. 2001. Los cenotes de la península de Yucatán. *En: G., de la Lanza-Espino y J., García-Calderón (Eds)*. AGT Editor. México. Pp.337-381.

Schmitter-Soto, J. J. 2007. Peces dulceacuícolas. *En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed)*. Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 257-264.

Schmitter-Soto, J. J. 2011. Peces. *En: Pozo, C. (Ed)*. Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp: 227-232.

Schmitter-Soto, J. J. 2020. La ictiofauna cenotícola (peces de cenote) más relevante de la península de Yucatán. *Bioagrobiocencias* 13(1): 9-22.

Schmitter-Soto, J. J. y H. C. Gamboa-Pérez. 1996. Composición y distribución de peces continentales en el sur de Quintana Roo, Península de Yucatán, México. *Rev. Biol. Trop.* 44(1): 199-212.

SEDESOL. 2011. Atlas de riesgos del municipio de Cozumel, Quintana Roo. Secretaria de Desarrollo Social. México. 159 p.

Segrado, R., P., Muñoz y L., Arroyo. 2008. Medición de la capacidad de carga turística de Cozumel. El Periplo Sustentable, núm. 13, enero, Universidad Autónoma del Estado de México. 2008. pp. 33-61

SEMAR-DIGAHOM. 2023. Derrotero Mexicano. Puertos Ambos Litorales. Puerto de Cozumel. San Miguel de Cozumel Quintana Roo. Secretaría de Marina. Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. Disponible en:





<https://digaohm.semarnat.gob.mx/derrotero/cuestionarios/cnarioCozumel.pdf>. Fecha de consulta 26 de abril 2023.

SEMARNAT. 2012. Los humedales en México. Oportunidades para la sociedad. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 28 p.

SEMARNAT. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 62 p.

SEMARNAT-INECC. 2022. Contribución Determinada a Nivel Nacional. Actualización 2022. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. 45 p.

SGM. 2006. Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológica Minera Cozumel F16-11. Escala 1:250, 000. México.

SIAP. 2023a. Anuario Estadístico de Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de Consulta: 13 de abril de 2023.

SIAP. 2023b. Anuario Estadístico de la Producción Ganadera. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/. Fecha de consulta: 13 de abril de 2023.

SISR. 2022. Humedales. México. Servicio de Información sobre Sitios Ramsar. Disponible desde: <https://www.ramsar.org/es/humedal/mexico>. Fecha de consulta: 29 de abril de 2023.

SMHI. 2023. Climate Information. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Disponible desde: <https://climateinformation.org/>. Fecha de consulta: 29 de abril de 2023.

Solís-Marín, F. A. y A. Laguarda-Figueras. 2007. Equinodermos. *En: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 187-210.*

Solís-Marín, F. A. y Laguarda-Figueras, A. 2010. A new species of starfish (Echinodermata: Asteroidea) from an anchialine cave in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81(3): 663–668. Solís-Marín, F. A., A. Laguarda-Figueras, F. Vázquez-Gutiérrez, L. M. Mejía-Ortíz y G. Yañez-Mendoza. 2010. Echinoderms fauna of anchialine caves in Cozumel Island, Mexico. *En: Harris, L. G, A. Boetger, C. W. Walker y M. P. Lesser (Eds). Echinoderms: Durham. CRC Press, London.*

Solís-Marín, F. A., A. Laguarda-Figueras y M. Honey-Escandón. 2014. Biodiversidad de equinodermos (Echinodermata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 441-449.

Steadman, D. W. 1995. Prehistoric extinctions of Pacific Island birds: biodiversity meets zooarchaeology. *Science* 267: 1,123–1,131.

Steadman, D. W. y P. S. Martin. 2003. The late Quaternary extinction and future resurrection of birds on Pacific islands. *Earth-Sciences Review* 63: 133-147.

Stock, J. H., T. M. Iliff y D. Williams. 1986. The concept “anchialine” reconsidered. *Stygologia* 2 (1/2): 90-92.





- Suárez-Morales, E. y E. Rivera-Arriaga. 1998. Hidrología y fauna acuática de los cenotes de la Península de Yucatán. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 48:37-47.
- Téllez-Valdés, O., E. F. Cabrera-Cano, E. Linares y R. Bye. 1989. Las plantas de Cozumel. Guía botánico-turística de la Isla Cozumel, Quintana Roo. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Tello, T. H. y E. Castellanos. 2011. Características geográficas. *En: Pozo, C., N. Armijo-Canto y S. Calmé (Eds). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp. 24-33.*
- Tiróle, J. 1988. *The Theory of Industrial Organization*. Cambridge. The MIT Press.
- Tropicos. 2022. Missouri Botanical Garden. 2022. Disponible en: <https://tropicos.org>. Fecha de consulta: 03 de mayo de 2023.
- Torres-Rodríguez, V., Bolongaro C. R. A., Márquez, A. Z., Anglés, O. Gutiérrez y Márquez H. A. 2018. Diagnóstico de vulnerabilidad ante el cambio climático del destino turístico de Cozumel, Quintana Roo. *En: Torres Rodríguez, V y A. Bolongaro, C. R. (Coords), Estudio de vulnerabilidad al cambio climático en destinos turísticos seleccionados. Informe Técnico Proyecto 293046. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo CONACYT-SECTUR. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A. C. 438 p.*
- Tovar-Hernández, M. A., P., Salazar-Silva, J. A., de León-González, L. F., Carrera-Parra y S. Salazar-Vallejo. 2014. Biodiversidad de Polychaeta (Annelida) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85: S190-S196, 2014.
- Trujillo, P. E., M., Chávez, V., Solos-Weiss y M., Hermoso. 2010. Peracarids (Crustacea: Malacostraca) from cenote Aerolito, Cozumel, Mexican Caribbean, *Cah. Biol. Mar.* (2010) 51: 177-180.
- Valdez-Hernández, M. y G. A. Islebe. 2011. Tipos de Vegetación en Quintana Roo. *En: Pozo, C. (Ed). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México. pp. 32-36.*
- Van Hengstum, P. J., J. N., Cresswell, G. A., Milne y T. M., Ilife. 2019. Development of anchialine cave habitats and karst subterranean estuaries since the last ice age. *Scientific Reports* 9:11907 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48058-8>.
- Vitousek, S.; Barnard, P. L. y Limber, P. 2017. Can beaches survive climate change? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 122: 1060–1067.
- Wilson, D. E. y D. M. Reeder. 2005. *Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference*. Johns Hopkins University Press. Vol. 2. 142 pp. Disponible en:





<https://www.departments.bucknell.edu/biology/resources/msw3/>. Fecha de consulta: 02 de mayo de 2023.

WoRMS Editorial Board. 2023. World Register of Marine Species. Disponible en: <https://www.marinespecies.org>. Fecha de consulta: 5 de mayo de 2023.

WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Working Group WRB. Vienna, Austria.

Yáñez-Mendoza, G., E. Zarza-González y L. M. Mejía-Ortíz. 2007. Sistemas anquihalinos. *En*: Mejía-Ortíz, L. M. (Ed). Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 49-70.





VI. ANEXOS

1) LISTADO DE ESPECIES

En la lista se integran taxones aceptados y válidos conforme a los sistemas de clasificación y catálogos de autoridades taxonómicas correspondientes a cada grupo biológico. La validación nomenclatural y de la distribución geográfica de los taxones, así como el estatus de residencia de las especies de aves se verificó en los siguientes referentes de información especializada: Tropicos.org (Tropicos, 2022), World Register of Marine Species (WORMS, 2023), The Reptile Database (Uetz, 2022), Red de Conocimientos sobre las Aves de México (Berlanga *et al.*, 2022), The Peters' Check-list of the Birds of the World Database (Lepage y Warnier, 2014), Checklist of Birds of the World by The Cornell Lab of Ornithology (Clements *et al.*, 2022), American Ornithological Society (Chesser *et al.*, 2022), Mammal Species of the World (Wilson y Reader, 2005), List of recent mammals of Mexico (Ramírez-Pulido *et al.*, 2014), Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2023), Integrated Taxonomic Information System (ITIS, 2022), Portal de Datos Abiertos UNAM-Colecciones Universitarias (DGRU, 2023), Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (CONABIO, 2023a), Catálogo de autoridades taxonómicas de especies de flora y fauna con distribución en México (CONABIO, 2023b); y Sistema de Información sobre Especies Invasoras (CONABIO, 2020c).

Las categorías de riesgo se presentan conforme a la Modificación del Anexo Normativo III de la NOM-059-SEMARNAT-2010 con las siguientes abreviaturas: A: Amenazada; Pr: Sujeta a protección especial; P: En peligro de extinción y E: Probablemente extinta en el medio silvestre.

Se indican con un triángulo (▲) las especies prioritarias conforme al Acuerdo por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación, publicado en el DOF el 5 de marzo de 2014.

Las especies endémicas de México se indican con un asterisco (*), además, se agrega la abreviatura CZ (*CZ) a los taxones endémicos a la isla de Cozumel, así como la abreviatura AE (*AE) a los taxones microendémicos del cenote El Aerolito.

Se señalan con dos asteriscos (**) las especies exóticas y con tres asteriscos (***) las especies exóticas-invasoras de conformidad con ACUERDO por el que se determina la Lista de las Especies Exóticas Invasoras para México publicado en el DOF el 7 de mayo de 2016.

En el caso de las aves, se indica el estatus de residencia con las siguientes abreviaturas: Residente (R), Migratoria de Invierno (MI), Migratoria de Verano (MV) y Transitoria (T). Para el hábitat de los invertebrados se utilizaron las abreviaturas: agua marina (M), agua dulce o dulce salobre (AD), haloclina (H) y terrestre (T).



**FLORA**

Division	Clase	Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría de riesgo
Tracheophyta	Equisetopsida	Arecales	Arecaceae	<i>Dypsis lutescens</i> ***	palma, palma areca	
Tracheophyta	Equisetopsida	Arecales	Arecaceae	<i>Sabal mexicana</i>	guano, palma, 'xa'an (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Arecales	Arecaceae	<i>Sabal yapa</i>	guano macho, bayal (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Asterales	Asteraceae	<i>Chromolaena odorata</i>	bejuco, x-tokabal (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Asterales	Asteraceae	<i>Otopappus guatemalensis</i>	incienso a'ak' (español-maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Asterales	Asteraceae	<i>Tridax procumbens</i>	San Juan del Monte	
Tracheophyta	Equisetopsida	Asterales	Asteraceae	<i>Trixis inula</i>	hierba blanca, sak' k'an a'ak' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Asterales	Goodeniaceae	<i>Scaevola taccada</i> **		
Tracheophyta	Equisetopsida	Brassicales	Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	papaya, 'ch' i'ch' put (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Caryophyllales	Amaranthaceae	<i>Alternanthera brasiliana</i>		
Tracheophyta	Equisetopsida	Caryophyllales	Nyctaginaceae	<i>Pisonia aculeata</i>	bejuco	
Tracheophyta	Equisetopsida	Caryophyllales	Polygonaceae	<i>Coccoloba cozumelensis</i>	cola de armadillo, boob (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Caryophyllales	Polygonaceae	<i>Coccoloba spicata</i>	uvero, bab (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Celastrales	Celastraceae	<i>Semialarium mexicanum</i>	chun t'ok' (maya), sak boob (maya), cancerina	
Tracheophyta	Equisetopsida	Cucurbitales	Cucurbitaceae	<i>Luffa cylindrica</i> **	estropajo	
Tracheophyta	Equisetopsida	Dioscoreales	Dioscoreaceae	<i>Dioscorea densiflora</i>	barbasco, barbasquillo	
Tracheophyta	Equisetopsida	Ericales	Ebenaceae	<i>Diospyros salicifolia</i>	coyolillo, ebano, pi'si' it (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Ericales	Primulaceae	<i>Jacquinia arborea</i>		
Tracheophyta	Equisetopsida	Ericales	Primulaceae	<i>Myrsine cubana</i>		
Tracheophyta	Equisetopsida	Ericales	Sapotaceae	<i>Sideroxylon americanum</i>	caimitillo, mulc'he' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Acacia cornigera</i>	cachito de toro, subin c'he' (maya)	





Division	Clase	Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría de riesgo
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Acacia dolichostachya</i>	kaanbal piich (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Aeschynomene americana</i>	tamarindo xiiw	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Coulteria platyloba*</i>	avellano	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Dalbergia glabra</i>	bejuco de estribo, k'uxub-tooch (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Gliricidia maculata</i>	cocoite, sak 'ya'ab (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Haematoxylum campechianum</i>	palo de Campeche, ek (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Lysiloma latisiliquum'</i> bo'ox salam (maya)		
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Piscidia piscipula</i>	barbasco, yaxmojan (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Swartzia cubensis</i>	palo azul, cattox (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Zapoteca formosa</i>	barba de chivo,	
Tracheophyta	Equisetopsida	Gentianales	Apocynaceae	<i>Cascabela gaumeri</i>	campanilla, a'ak'its (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Gentianales	Rubiaceae	<i>Hamelia patens</i>	aretillo,' k'anal c'he' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Lamiales	Bignoniaceae	<i>Crescentia cujete</i>	ayale, luch (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Lamiales	Lamiaceae	<i>Vitex mollis*</i>	aceitunillo	
Tracheophyta	Equisetopsida	Lamiales	Scrophulariaceae	<i>Capraria biflora</i>	hierba del burro, chokuil-xiu (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Euphorbiaceae	<i>Croton arboreus</i>	p'e'es' k'uuch (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Euphorbiaceae	<i>Croton reflexifolius</i>	casarilla, chiim kuuts (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Euphorbiaceae	<i>Gymnanthes lucida</i>	palo de asta, 'ts'iitil (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Malpighiaceae	<i>Byrsonima crassifolia</i>	nance agrio	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Putranjivaceae	<i>Drypetes lateriflora</i>	huesillo, ekulub (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i>	mangle rojo	A
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Salicaceae	<i>Laetia thamnina</i>	zapote amarillo, 'ch'aw c'he' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Malvales	Malvaceae	<i>Hampea trilobata</i>	majagua, hol (maya)	





Division	Clase	Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría de riesgo
Tracheophyta	Equisetopsida	Malvales	Malvaceae	<i>Malvaviscus arboreus</i>	aretillo, joolol (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Myrtales	Myrtaceae	<i>Eugenia acapulcensis</i>	capulincillo	
Tracheophyta	Equisetopsida	Myrtales	Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	guayaba, pichi (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Picramniales	Picramniaceae	<i>Picramnia antidesma</i>	chillo, 'k'anchin a'ak' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Poales	Poaceae	<i>Lasiacis divaricata</i>	carrizo, taabil 'si' (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Poales	Typhaceae	<i>Typha domingensis</i>	tule	
Tracheophyta	Equisetopsida	Rosales	Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i>	capomo, 'k' an oox (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Rosales	Rhamnaceae	<i>Colubrina arborescens</i>	casalote, cak'te' kajum (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Anacardiaceae	<i>Metopium brownei</i>	chechem negro, boox chechem (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i>	cacho de toro, cha-kah (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	cedro colorado, cedro rojo	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Rutaceae	<i>Amyris sylvatica</i>	k'an yuuk (maya), palo de gas	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Rutaceae	<i>Esenbeckia berlandieri</i>	hueso de tigre, yaaxhokob (maya)	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Sapindaceae	<i>Cupania glabra</i>	cojote venado, cola de pava	
Tracheophyta	Equisetopsida	Sapindales	Sapindaceae	<i>Thouinia paucidentata</i>	hueso de tigre, 'k' aan chunukub (maya)	
Tracheophyta	Magnoliopsida	Malpighiales	Salicaceae	<i>Casearia thamnia</i>	zapote amarillo	
Tracheophyta	Magnoliopsida	Rosales	Urticaceae	<i>Cecropia peltata</i>	yarumo	
Tracheophyta	Polypodiopsida	Polypodiales	Pteridaceae	<i>Acrostichum aureum</i>	helecho	
Tracheophyta	Polypodiopsida	Polypodiales	Pteridaceae	<i>Acrostichum danaeifolium</i>	helecho de playa	





FAUNA

Invertebrados

Espojas (Phylum Porifera)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Hábitat
Demospongiae	Astrophorida	Geodiidae	<i>Geodia neptuni</i>	demosponja	M
Demospongiae	Clionaida	Spirastrellidae	<i>Diplastrella megastellata</i>	demosponja	M
Demospongiae	Poecilosclerida	Acaridae	<i>Acarus innominatus</i>	demosponja	M
Demospongiae	Tetractinellida	Scleritodermidae	<i>Aciculites higginsii</i>	demosponja	M
Demospongiae	Tetractinellida	Scleritodermidae	<i>Amphibleptula aaktun</i> *AE	demosponja	M
Homoscleromorpha	Homosclerophorida	Plakinidae	<i>Plakortis angulospiculatus</i>	demosponja	M

Corales (Phylum Cnidaria)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Categoría de riesgo	Hábitat
Anthozoa	Corallimorpharia	Corallimorphidae	<i>Corynactis caribbeorum</i>			AD
Anthozoa	Penicillaria	Arachnactidae	<i>Isarachnanthus nocturnus</i>	anémona		M
Anthozoa	Scleractinia	Dendrophylliidae	<i>Balanophyllia bayeri</i>	coral verdadero		M

Moluscos (Phylum Mollusca)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Categoría de riesgo	Hábitat
Bivalvia	Arcida	Arcidae	<i>Fugleria tenera</i>	batea		M
Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Ctenoides scaber</i>	almeja lima		M
Bivalvia	Pteriida	Isognomonidae	<i>Isognomon alatus</i>	callo de árbol	Pr	M
Gastropoda	Neogastropoda	Marginellidae	<i>Volvarina avena</i>	arrocillo		M
Gastropoda	No Asignado	Cypraeidae	<i>Luria cinerea</i>	caracol porcelana gris del Atlántico		M
Gastropoda	No Asignado	Cypraeidae	<i>Macrocypraea zebra</i>	negro maco, papaya		M



Anélidos (Phylum Annelida)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Hábitat
Polychaeta	Amphinomida	Amphinomidae	<i>Hermodice carunculata</i>	gusano de fuego	M
Polychaeta	Amphinomida	Amphinomidae	<i>Notopygos caribea</i>	poliqueto	M
Polychaeta	Capitellida	Capitellidae	<i>Capitella aciculata</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Capitellida	Capitellidae	<i>Capitella capitata</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Capitellida	Capitellidae	<i>Heteromastus filiformis</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Cirratulida	Paraonidae	<i>Paradoneis lyra</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Eunicida	Dorvilleidae	<i>Dorvillea moniloceras</i>	poliqueto	M
Polychaeta	Phyllodocida	Nereididae	<i>Stenoninereis martini</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Phyllodocida	Syllidae	<i>Erinaceusyllis centroamericana</i>	poliqueto	M
Polychaeta	Phyllodocida	Syllidae	<i>Syllis maryae</i>	poliqueto	AD
Polychaeta	Phyllodocida	Syllidae	<i>Syllis prolifera</i>	poliqueto	AD

Estrellas, erizos y pepinos de mar (Phylum Echinodermata)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Hábitat
Asteroidea	Paxillosida	Astropectinidae	<i>Astropecten duplicatus</i>	estrella de mar	
Asteroidea	Valvatida	Asterinidae	<i>Asterinides folium</i>	estrella de mar	M
Asteroidea	Valvatida	Asterinidae	<i>Asterinides pompom</i>	estrella de mar	M
Asteroidea	Valvatida	Mithrodiidae	<i>Mithrodia clavigera</i>	estrella de mar	M
Asteroidea	Valvatida	Ophiasteridae	<i>Copidaster cavernicola</i> ^{*AE}	estrella de mar	H, M
Asteroidea	Valvatida	Ophiasteridae	<i>Copidaster lymani</i>	estrella de mar	
Echinoidea	Camarodonta	Toxopneustidae	<i>Lytechinus variegatus</i>	erizo de mar	
Echinoidea	Cidaroida	Cidaridae	<i>Eucidaris tribuloides</i>	erizo de mar	AD, H, M
Echinoidea	Diadematoida	Diadematidae	<i>Diadema antillarum</i>	erizo de mar, erizo diadema	
Echinoidea	Spatangoida	Brissidae	<i>Brissopsis atlántica</i>	erizo corazón	M
Echinoidea	Spatangoida	Brissidae	<i>Meoma ventricosa</i>	erizo corazón	
Holothuroidea	Apodida	Synaptidae	<i>Euapta lappa</i>	pepino de mar	H, M
Holothuroidea	Aspidochirotida	Holothuriidae	<i>Holothuria surinamensis</i>	pepino de mar	
Ophiuroidea	Amphilepidida	No asignado	<i>Amphicutis stygobita</i>		
Ophiuroidea	Amphilepidida	Ophiactidae	<i>Ophiactis algicola</i>		
Ophiuroidea	Ophiacanthida	Ophiocomidae	<i>Ophiomastix wendtii</i>		M
Ophiuroidea	Ophiurida	Amphiuridae	<i>Amphipholis squamata</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiocomidae	<i>Ophiocoma aethiops</i>	ofiuro	





Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Hábitat
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiocomidae	<i>Ophiocoma wendtii</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiodermatidae	<i>Ophioderma appressum</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiodermatidae	<i>Ophioderma ensiferum</i>	ofiuro	
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiolepididae	<i>Ophiolepis impressa</i>	ofiuro	
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiolepididae	<i>Ophiomusium testudo</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophionereididae	<i>Ophionereis commutabilis</i> * ^{AE}	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophionereididae	<i>Ophionereis reticulata</i>	ofiuro	H. M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiothricidae	<i>Ophiothrix angulata</i>	ofiuro	
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiothricidae	<i>Ophiothrix brachyactis</i>	ofiuro	
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiothricidae	<i>Ophiothrix lineata</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiothricidae	<i>Ophiothrix orstedii</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiothricidae	<i>Ophiothrix suensonii</i>	ofiuro	M
Ophiuroidea	Ophiurida	Ophiuridae	<i>Ophiura ljungmani</i>	ofiuro	

Artrópodos (Phylum Arthropoda)**Crustáceos (Subphylum Crustacea)**

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Hábitat
Malacostraca	Amphipoda	Ampithoidae	<i>Cymadusa herrerae</i> * ^{AE}	anfípodo	AD
Malacostraca	Amphipoda	Hadziidae	<i>Bahadzia bozanici</i> *	anfípodo	
Malacostraca	Amphipoda	Hyalidae	<i>Parhyale hawaiiensis</i>	anfípodo	AD
Malacostraca	Amphipoda	Melitidae	<i>Melita longisetosa</i>	anfípodo	AD
Malacostraca	Amphipoda	Melitidae	<i>Melita planaterga</i>	anfípodo	AD
Malacostraca	Decapoda	Alpheidae	<i>Yagerocaris cozumel</i> * ^{CZ}	camarón chasqueador	M
Malacostraca	Decapoda	Procarididae	<i>Procaris mexicana</i> *	camarón	M
Malacostraca	Decapoda	Gecarcinidae	<i>Cardisoma guanhumi</i>	cangrejo azul de tierra	T
Malacostraca	Decapoda	Stenopodidae	<i>Stenopus hispidus</i>	camarón boxeador	M
Malacostraca	Isopoda	Cirolanidae	<i>Cirolana adriani</i> * ^{AE}	cochinilla	AD
Malacostraca	Isopoda	Cirolanidae	<i>Metacirolana mayana</i> *	cochinilla	M
Malacostraca	Tanaidacea	Leptocheliidae	<i>Leptochelia rapax</i>	camaroncito tanaida	AD
Ostracoda	Halocyprida	Polycopidae	<i>Pseudopolycope helix</i>	ostrácodo	



Vertebrados (Phylum Chordata)
Clase Osteichthyes (Peces óseos)

Clase	Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo
Chondrichthyes	Rajiformes	Urotrygonidae	<i>Urobatis jamaicensis</i>	raya redonda de estero	
Osteichthyes	Acanthuriformes	Acanthuridae	<i>Acanthurus chirurgus</i>	cirujano rayado	
Osteichthyes	Carangiformes	Carangidae	<i>Caranx ruber</i>	cojinuda carbonera	
Osteichthyes	Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Gambusia yucatanana</i>	guayacón yucateco	
Osteichthyes	Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Poecilia velífera*</i>	topote aleta grande	A
Osteichthyes	Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	guatopote manchado	
Osteichthyes	Gobiiformes	Gobiidae	<i>Bathygobius soporator</i>	mapo aguado	
Osteichthyes	Istiophoriiformes	Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i>	barracuda	
Osteichthyes	Labriformes	Scaridae	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	pez loro banda roja	Pr
Osteichthyes	Labriformes	Scaridae	<i>Sparisoma viride</i>	pez loro semáforo	Pr
Osteichthyes	Ophidiiformes	Bythitidae	<i>Typhliasina pearsei*</i>	dama blanca ciega	P
Osteichthyes	Perciformes	Chaetodontidae	<i>Chaetodon capistratus</i>	mariposa ocelada	
Osteichthyes	Perciformes	Chaetodontidae	<i>Chaetodon ocellatus</i>	mariposa perla amarilla	
Osteichthyes	Perciformes	Chaetodontidae	<i>Chaetodon striatus</i>	mariposa rayada	
Osteichthyes	Perciformes	Haemulidae	<i>Haemulon flavolineatum</i>	ronco condenado	
Osteichthyes	Perciformes	Haemulidae	<i>Haemulon plumierii</i>	bocayate blanco	
Osteichthyes	Perciformes	Kyphosidae	<i>Kyphosus vaigiensis</i>	chopa amarilla	
Osteichthyes	Perciformes	Lutjanidae	<i>Lutjanus apodus</i>	pargo canchix	
Osteichthyes	Perciformes	Lutjanidae	<i>Ocyurus chrysurus</i>	rubia	
Osteichthyes	Perciformes	Pomacanthidae	<i>Holacanthus tricolor</i>	chabelita tricolor	
Osteichthyes	Perciformes	Pomacanthidae	<i>Pomacanthus paru</i>	gallineta negra	
Osteichthyes	Tetraodontiformes	Balistidae	<i>Melichthys niger</i>	cochito negro	
Osteichthyes	Tetraodontiformes	Monacanthidae	<i>Cantherhines pullus</i>	lija colorada	





Clase Reptilia (Reptiles)

Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo
Crocodylia	Crocodylidae	<i>Crocodylus acutus</i>	cocodrilo de río	Pr
Squamata	Dactyloidae	<i>Anolis sagrei</i> ***	abaniquillo pardo del Caribe	
Squamata	Teiidae	<i>Aspidoscelis cozumela</i> *CZ	huico de Cozumel	A
Squamata	Boidae	<i>Boa imperator</i> ***	boa constrictor, káxab yuk (maya)	A (Publicado en la Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 como <i>Boa constrictor</i>)
Squamata	Corytophanidae	<i>Basiliscus vittatus</i>	toloque rayado	

Clase Aves (Aves)

Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Accipitriformes	Pandionidae	<i>Pandion haliaetus</i> *	águila pescadora		R
Anseriformes	Anatidae	<i>Spatula discors</i> *	cerceta alas azules		MI
Apodiformes	Apodidae	<i>Chaetura pelagica</i>	vencejo de chimenea		T
Apodiformes	Apodidae	<i>Chaetura vauxi</i>	vencejo de Vaux		R
Apodiformes	Trochilidae	<i>Anthracothorax prevostii</i>	colibrí garganta negra		R
Apodiformes	Trochilidae	<i>Cynanthus forficatus</i> *CZ	colibrí esmeralda de Cozumel		R
Caprimulgiformes	Caprimulgidae	<i>Chordeiles acutipennis</i>	chotacabras menor		MV
Caprimulgiformes	Caprimulgidae	<i>Nyctidromus albicollis</i>	chotacabras pauraque		R
Cathartiformes	Cathartidae	<i>Cathartes aura</i>	zopilote aura		R
Cathartiformes	Cathartidae	<i>Coragyps atratus</i>	zopilote común		R
Charadriiformes	Charadriidae	<i>Charadrius semipalmatus</i>	chorlo semipalmeado		MI





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Charadriiformes	Charadriidae	<i>Charadrius vociferus</i>	chorlo tildío		MI
Charadriiformes	Charadriidae	<i>Charadrius wilsonia</i>	chorlo pico grueso		R
Charadriiformes	Jacanidae	<i>Jacana spinosa</i>	jacana norteña		R
Charadriiformes	Laridae	<i>Larus delawarensis</i>	gaviota pico anillado		MI
Charadriiformes	Laridae	<i>Leucophaeus atricilla</i>	gaviota reidora		MI
Charadriiformes	Laridae	<i>Thalasseus maximus</i>	charrán real		MI
Charadriiformes	Scolopacidae	<i>Actitis macularius</i>	playero alzacolita		MI
Charadriiformes	Scolopacidae	<i>Arenaria interpres</i>	vuelvepiedras rojizo		MI
Charadriiformes	Scolopacidae	<i>Calidris minutilla</i>	playero diminuto		MI
Columbiformes	Columbidae	<i>Columba livia</i> ***	paloma común		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Columbina passerina</i>	tortolita pico rojo		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Columbina talpacoti</i>	tortolita canela		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Leptotila jamaicensis</i>	paloma caribeña		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Patagioenas leucocephala</i>	paloma corona blanca	A	R
Columbiformes	Columbidae	<i>Streptopelia decaocto</i> ***	paloma de collar turca		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Zenaida asiatica</i> *	paloma alas blancas		R
Columbiformes	Columbidae	<i>Zenaida aurita</i>	paloma aurita	Pr	R
Coraciiformes	Alcedinidae	<i>Megaceryle alcyon</i>	martín pescador norteño		MI
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Coccyzus minor</i>	cuclillo manglero		R
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	garrapatero pijuy		R
Falconiformes	Falconidae	<i>Falco columbarius</i>	halcón esmerejón		MI
Falconiformes	Falconidae	<i>Falco peregrinus</i>	halcón peregrino	Pr	MI
Gruiformes	Rallidae	<i>Fulica americana</i>	gallareta americana		MI
Gruiformes	Rallidae	<i>Gallinula galeata</i>	gallineta frente roja		MI
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Cardinalis cardinalis</i> subsp. <i>saturatus</i> *CZ	cardenal rojo de Cozumel		R
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Passerina caerulea</i>	picogordo azul		MI
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Passerina cyanea</i>	colorín azul		MI
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Piranga olivacea</i>	piranga escarlata		T





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Piranga roseogularis</i>	piranga yucateca		R
Passeriformes	Cardinalidae	<i>Piranga rubra</i>	piranga roja		MI
Passeriformes	Estrildidae	<i>Lonchura punctulata</i> ***	capuchino pecho escamoso		R
Passeriformes	Hirundinidae	<i>Hirundo rustica</i>	golondrina tijereta		T
Passeriformes	Hirundinidae	<i>Petrochelidon fulva</i>	golondrina pueblera		R
Passeriformes	Hirundinidae	<i>Progne chalybea</i>	golondrina pecho gris		MV
Passeriformes	Hirundinidae	<i>Stelgidopteryx serripennis</i> subsp. <i>ridgwayi</i>	golondrina yucateca		R
Passeriformes	Hirundinidae	<i>Tachycineta albilinea</i>	golondrina manglera		R
Passeriformes	Icteridae	<i>Icterus cucullatus</i>	calandria dorso negro menor		R
Passeriformes	Icteridae	<i>Icterus galbula</i>	calandria de Baltimore		MI
Passeriformes	Icteridae	<i>Icterus gularis</i>	calandria dorso negro mayor		R
Passeriformes	Icteridae	<i>Icterus spurius</i>	calandria castaña		MI
Passeriformes	Icteridae	<i>Quiscalus mexicanus</i>	zanate mayor		R
Passeriformes	Mimidae	<i>Dumetella carolinensis</i>	maullador gris		MI
Passeriformes	Mimidae	<i>Melanoptila glabrirostris</i> *	maullador negro	Pr	R
Passeriformes	Mimidae	<i>Mimus gilvus</i>	centzontle tropical		R
Passeriformes	Mimidae	<i>Toxostoma guttatum</i> *CZ	cuitlacoche de Cozumel	P	R
Passeriformes	Parulidae	<i>Geothlypis trichas</i>	mascarita común		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Helmitheros vermivorum</i>	chipe gusanero		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Leiothlypis peregrina</i>	chipe peregrino		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Limnothlypis swainsonii</i>	chipe corona café	Pr	MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Mniotilta varia</i>	chipe trepador		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Parkesia motacilla</i>	chipe arroyero		T
Passeriformes	Parulidae	<i>Parkesia noveboracensis</i>	chipe charquero		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Protonotaria citrea</i>	chipe dorado		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Seiurus aurocapilla</i>	chipe suelero		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga americana</i>	chipe pecho manchado		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga caerulescens</i>	chipe azul negro		MI





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga castanea</i>	chipe castaño		T
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga citrina</i>	chipe encapuchado		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga coronata</i>	chipe rabadilla amarilla		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga discolor</i>	chipe de pradera		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga dominica</i>	chipe garganta amarilla		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga magnolia</i>	chipe de magnolias		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga palmarum</i>	chipe playero		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga petechia</i> subsp. <i>rufivertex</i> *CZ	chipe de Cozumel		R
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga ruticilla</i>	pavito migratorio		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga striata</i>	chipe cabeza negra		T
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga tigrina</i>	chipe atigrado		MI
Passeriformes	Parulidae	<i>Setophaga virens</i>	chipe dorso verde		MI
Passeriformes	Poliptilidae	<i>Poliptila caerulea</i> subsp. <i>cozumelae</i> *CZ	perlita azul gris de Cozumel		R
Passeriformes	Spindalidae	<i>Spindalis zena</i> subsp. <i>benedicti</i> *CZ	tangara cabeza rayada		R
Passeriformes	Thraupidae	<i>Coereba flaveola</i>	reinita mielera		R
Passeriformes	Thraupidae	<i>Sporophila moreletii</i>	semillero de collar		R
Passeriformes	Thraupidae	<i>Tiaris olivaceus</i>	semillero oliváceo		R
Passeriformes	Thraupidae	<i>Volatinia jacarina</i>	semillero brincador		R
Passeriformes	Troglodytidae	<i>Troglodytes aedon</i> subsp. <i>beanii</i> *CZ	chivirín saltapared de Cozumel	Pr	R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Attila spadiceus</i> subsp. <i>cozumelae</i> *CZ	atila de Cozumel	Pr	R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Camptostoma imberbe</i>	mosquerito chillón		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Contopus cinereus</i>	papamoscas tropical		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Contopus virens</i>	papamoscas del este		T
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Elaenia flavogaster</i>	mosquero elenia copetón		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Elaenia martinica</i>	mosquero elenia caribeño		R





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Myiarchus tuberculifer</i>	papamoscas triste		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Myiarchus tyrannulus</i>	papamoscas gritón		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Myiarchus yucatanensis</i>	papamoscas yucateco		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Myiozetetes similis</i>	Luis gregario, luisito común		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Pitangus sulphuratus</i>	Luis bienteveo		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Tyrannus couchii</i>	tirano cuír		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Tyrannus melancholicus</i>	tirano pirirí		R
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Tyrannus tyrannus</i>	tirano dorso negro		T
Passeriformes	Vireonidae	<i>Cyclarhis gujanensis</i> subsp. <i>insularis</i> *CZ	vireón ceja rufa de Cozumel	Pr	R
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo bairdi</i> *CZ	vireo de Cozumel	A	R
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo flavifrons</i>	vireo garganta amarilla		MI
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo griseus</i>	vireo ojos blancos		MI
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo magister</i>	vireo yucateco		R
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo olivaceus</i>	vireo ojos rojos		T
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo philadelphicus</i>	vireo de Filadelfia		MI
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Ardea alba</i>	garza blanca		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Ardea herodias</i>	garza morena		MI
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Bubulcus ibis</i> ***	garza ganadera		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Butorides virescens</i>	garcita verde		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta caerulea</i>	garza azul		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta rufescens</i>	garza rojiza	P	MI
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta thula</i>	garza dedos dorados		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta tricolor</i>	garza tricolor		R
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Nyctanassa violacea</i>	garza nocturna corona clara		MI
Pelecaniformes	Pelecanidae	<i>Pelecanus occidentalis</i>	pelícano café		R
Pelecaniformes	Threskiornithidae	<i>Eudocimus albus</i>	ibis blanco		MI
Pelecaniformes	Threskiornithidae	<i>Platalea ajaja</i> *	espátula rosada		MI
Piciformes	Picidae	<i>Melanerpes aurifrons</i>	carpintero chejé		R





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo	Estatus de residencia
Piciformes	Picidae	<i>Melanerpes pygmaeus</i>	carpintero yucateco		R
Piciformes	Picidae	<i>Sphyrapicus varius</i>	carpintero moteado		MI
Podicipediformes	Podicipedidae	<i>Tachybaptus dominicus</i>	zambullidor menor	Pr	R
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Amazona albifrons</i> *	loro frente blanca	Pr	R
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Eupsittula nana</i> *	perico pecho sucio	Pr	R
Suliformes	Fregatidae	<i>Fregata magnificens</i>	fragata tijereta		R
Trogoniformes	Trogonidae	<i>Trogon melanocephalus</i>	coa cabeza negra		R

Clase Mammalia (Mamíferos)

Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo
Carnivora	Canidae	<i>Canis lupus</i> subsp. <i>familiaris</i> ***	perro domestico	
Carnivora	Procyonidae	<i>Nasua narica</i> subsp. <i>nelsoni</i> *CZ	tejón de Cozumel	A
Carnivora	Procyonidae	<i>Procyon pygmaeus</i> *CZ	mapache de Cozumel	P
Cetartiodactyla	Cervidae	<i>Odocoileus virginianus</i> *	venado cola blanca	
Chiroptera	Molossidae	<i>Molossus rufus</i>	murciélago mastín negro	
Chiroptera	Molossidae	<i>Molossus sinaloae</i>	murciélago mastín de Sinaloa	
Chiroptera	Mormoopidae	<i>Pteronotus davyi</i>	murciélago lomo pelón menor	
Chiroptera	Mormoopidae	<i>Pteronotus parnellii</i>	murciélago bigotudo de Parnell	
Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Eptesicus furinalis</i>	murciélago pardo común	
Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Lasiurus borealis</i>	murciélago cola peluda rojizo	
Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Lasiurus ega</i>	murciélago cola peluda amarillo	
Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Myotis keaysi</i>	miotis de piernas peludas	
Chiroptera	Vespertilionidae	<i>Rhogeessa aeneus</i>	murciélago amarillo yucateco	
Chiroptera	Phyllostomidae	<i>Artibeus jamaicensis</i>	murciélago frutero	





2) ESPECIES DE FLORA Y FAUNA EN ALGUNA CATEGORÍA DE RIESGO CONFORME A LA NOM-059-SEMARNAT-2010, REGISTRADAS EN LA PROPUESTA DE APFF CENOTE AEROLITO

En la lista se integran los taxones válidos conforme a los sistemas de clasificación y catálogos de autoridades taxonómicas correspondientes.

Las categorías de riesgo se presentan conforme a la Modificación del Anexo Normativo III de la NOM-059-SEMARNAT-2010 con las siguientes abreviaturas: A: amenazada; Pr: sujeta a protección especial; P: en peligro de extinción y E; probablemente extinta en el medio silvestre. Asimismo, se indican con un asterisco (*) las especies endémicas, resaltando las que se distribuyen solo en Cozumel con la abreviatura (*CZ).

FLORA

Division	Clase	Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría de riesgo
Tracheophyta	Equisetopsida	Malpighiales	Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i>	mangle rojo	A

FAUNA

INVERTEBRADOS

Moluscos (Phylum Mollusca)

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre común	Categoría de riesgo
Bivalvia	Pteriida	Isognomonidae	<i>Isognomon alatus</i>	ostra árbol	Pr

VERTEBRADOS

Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo
PECES				
Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Poecilia velifera*</i>	topote aleta grande	A
Scaridae	Sparisoma	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	pez loro banda roja	Pr
Scaridae	Sparisoma	<i>Sparisoma viride</i>	pez loro semáforo	Pr





Orden	Familia	Especie o infraespecie	Nombre común	Categoría de riesgo
Ophidiiformes	Bythitidae	<i>Typhliasina pearsei*</i>	dama blanca ciega	P
REPTILES				
Crocodylia	Crocodylidae	<i>Crocodylus acutus</i>	cocodrilo de río	Pr
Squamata	Teiidae	<i>Aspidoscelis cozumela*^{CZ}</i>	huico de Cozumel	A
Squamata	Boidae	<i>Boa imperator***</i>	boa constrictor, káxab yuk (maya)	A (Publicado en la Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 como <i>Boa constrictor</i>)
AVES				
Columbiformes	Columbidae	<i>Patagioenas leucocephala</i>	paloma corona blanca	A
Columbiformes	Columbidae	<i>Zenaida aurita</i>	paloma aurita	Pr
Falconiformes	Falconidae	<i>Falco peregrinus</i>	halcón peregrino	Pr
Passeriformes	Mimidae	<i>Melanoptila glabrirostris*</i>	maullador negro	Pr
Passeriformes	Mimidae	<i>Toxostoma guttatum*^{CZ}</i>	cuitlacoche de Cozumel	P
Passeriformes	Parulidae	<i>Limnothlypis swainsonii</i>	chipe corona café	Pr
Passeriformes	Troglodytidae	<i>Troglodytes aedon</i> subsp. <i>beani*^{CZ}</i>	chivirín saltapared de Cozumel	Pr
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Attila spadiceus</i> subsp. <i>cozumelae*^{CZ}</i>	atila de Cozumel	Pr
Passeriformes	Vireonidae	<i>Cyclarhis gujanensis</i> subsp. <i>insularis*^{CZ}</i>	vireón ceja rufa de Cozumel	Pr
Passeriformes	Vireonidae	<i>Vireo bairdi*^{CZ}</i>	vireo de Cozumel	A
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta rufescens</i>	garza rojiza	P
Podicipediformes	Podicipedidae	<i>Tachybaptus dominicus</i>	zambullidor menor	Pr
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Amazona albifrons*</i>	loro frente blanca	Pr
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Eupsittula nana*</i>	perico pecho sucio	Pr
MAMÍFEROS				
Carnivora	Procyonidae	<i>Nasua narica</i> subsp. <i>nelsoni*^{CZ}</i>	tejón de Cozumel	A
Carnivora	Procyonidae	<i>Procyon pygmaeus*^{CZ}</i>	mapache de Cozumel	P





3) LISTA DE COORDENADAS

Área de Protección de Flora y Fauna Cenote Aerolito

Superficie total (10-19-91.13 hectáreas)
Proyección UTM zona 16 norte
DATUM ITRF08

POLÍGONO 1

Superficie (3-69-35.89 hectáreas)

Vértice	X	Y
1	502,365.428700	2,263,174.222100
2	502,370.061300	2,263,174.134400
3	502,374.645000	2,263,174.811800
4	502,379.054200	2,263,176.235900
5	502,379.351300	2,263,176.348900
6	502,379.481700	2,263,175.504300
7	502,381.256600	2,263,175.776300
8	502,381.145400	2,263,176.618600
9	502,381.913300	2,263,176.533400
10	502,382.659000	2,263,176.330800
11	502,383.364500	2,263,176.015800
12	502,384.013100	2,263,175.595900
13	502,455.063700	2,263,121.362600
14	502,442.037900	2,263,106.221600
15	502,434.804900	2,263,112.439400
16	502,428.285900	2,263,104.856400
17	502,435.516200	2,263,098.640800
18	502,325.243900	2,262,970.461200
19	502,270.447900	2,263,017.585400
20	502,258.069000	2,263,009.324700
21	502,250.562800	2,263,009.011100

Vértice	X	Y
22	502,254.326800	2,262,991.323200
23	502,208.650000	2,262,994.544400
24	502,213.316300	2,263,060.194800
25	502,241.084000	2,263,104.310900
26	502,224.510700	2,263,156.258500
27	502,230.323500	2,263,163.884000
28	502,231.109000	2,263,163.208000
29	502,231.630000	2,263,163.915000
30	502,230.855300	2,263,164.581600
31	502,259.968100	2,263,202.773400
32	502,287.345000	2,263,238.688400
33	502,340.561800	2,263,198.068900
34	502,341.602300	2,263,193.553700
35	502,343.373200	2,263,189.272000
36	502,345.825900	2,263,185.340900
37	502,348.893300	2,263,181.868100
38	502,352.491400	2,263,178.948700
39	502,356.521800	2,263,176.662700
40	502,360.873900	2,263,175.072700
1	502,365.428700	2,263,174.222100



POLÍGONO 2
Superficie (3-39-68.53 hectáreas)

Vértice	X	Y
1	502,577.598700	2,263,423.925500
2	502,579.297200	2,263,423.000600
3	502,579.732900	2,263,423.800800
4	502,652.904200	2,263,383.959000
5	502,636.518300	2,263,351.103600
6	502,617.933800	2,263,319.439800
7	502,597.237100	2,263,289.114600
8	502,584.585100	2,263,272.549900
9	502,571.302100	2,263,256.486900
10	502,563.230700	2,263,247.486100
11	502,534.415500	2,263,213.711600
12	502,523.166800	2,263,200.526900
13	502,503.245800	2,263,177.369900
14	502,486.723000	2,263,158.163200
15	502,470.089800	2,263,138.827800
16	502,397.968300	2,263,193.878000
17	502,397.698500	2,263,194.099300
18	502,397.444700	2,263,194.338900
19	502,397.208200	2,263,194.595600
20	502,396.990200	2,263,194.868200
21	502,396.791800	2,263,195.155400
22	502,396.613900	2,263,195.455600
23	502,396.457400	2,263,195.767600
24	502,396.323000	2,263,196.089700
25	502,396.211400	2,263,196.420400
26	502,396.123100	2,263,196.758100
27	502,396.058600	2,263,197.101100
28	502,396.018200	2,263,197.447800
29	502,396.002100	2,263,197.796400
30	502,396.010400	2,263,198.145300
31	502,396.042900	2,263,198.492800
32	502,396.218400	2,263,200.326700
33	502,396.273000	2,263,202.168100
34	502,396.206400	2,263,204.009200

Vértice	X	Y
35	502,396.018800	2,263,205.841800
36	502,395.711200	2,263,207.658200
37	502,395.284800	2,263,209.450400
38	502,394.741500	2,263,211.210800
39	502,394.083600	2,263,212.931500
40	502,393.314100	2,263,214.605300
41	502,393.169000	2,263,214.922400
42	502,393.046400	2,263,215.248800
43	502,392.946900	2,263,215.582900
44	502,392.870900	2,263,215.923200
45	502,392.818700	2,263,216.267900
46	502,392.790700	2,263,216.615500
47	502,392.787000	2,263,216.964100
48	502,392.807600	2,263,217.312200
49	502,392.852400	2,263,217.657900
50	502,392.921100	2,263,217.999700
51	502,393.013500	2,263,218.335900
52	502,393.129100	2,263,218.664900
53	502,393.267300	2,263,218.984900
54	502,393.427500	2,263,219.294600
55	502,393.608900	2,263,219.592400
56	502,393.810600	2,263,219.876800
57	502,442.024700	2,263,283.041300
58	502,442.684900	2,263,282.537500
59	502,443.259800	2,263,283.290700
60	502,443.790500	2,263,283.985900
61	502,443.130300	2,263,284.489800
62	502,501.591700	2,263,361.079800
63	502,502.254900	2,263,360.573600
64	502,502.756800	2,263,361.231200
65	502,503.430900	2,263,362.114400
66	502,502.768100	2,263,362.620300
67	502,546.729200	2,263,420.214300
68	502,546.942100	2,263,420.474600



Vértice	X	Y
69	502,547.172000	2,263,420.720000
70	502,547.418000	2,263,420.949400
71	502,547.678700	2,263,421.161800
72	502,547.953200	2,263,421.356100
73	502,548.240100	2,263,421.531600
74	502,548.538200	2,263,421.687300
75	502,548.846000	2,263,421.822700
76	502,549.162300	2,263,421.937100
77	502,549.485500	2,263,422.029900
78	502,549.814200	2,263,422.100800
79	502,550.147000	2,263,422.149500
80	502,550.482300	2,263,422.175700
81	502,550.818600	2,263,422.179300
82	502,551.154300	2,263,422.160200
83	502,551.488000	2,263,422.118700
84	502,551.818200	2,263,422.054800
85	502,553.753900	2,263,421.678600
86	502,555.710100	2,263,421.430500
87	502,557.678400	2,263,421.311300
88	502,559.650200	2,263,421.321800
89	502,561.617100	2,263,421.461700
90	502,563.570600	2,263,421.730600

Vértice	X	Y
91	502,565.502200	2,263,422.127200
92	502,567.403500	2,263,422.649800
93	502,569.266400	2,263,423.296300
94	502,571.082800	2,263,424.063700
95	502,572.844900	2,263,424.948700
96	502,573.141900	2,263,425.097800
97	502,573.448100	2,263,425.226700
98	502,573.762200	2,263,425.335100
99	502,574.082800	2,263,425.422400
100	502,574.408500	2,263,425.488100
101	502,574.737800	2,263,425.532100
102	502,575.069300	2,263,425.554100
103	502,575.401600	2,263,425.554100
104	502,575.733100	2,263,425.532000
105	502,576.062400	2,263,425.487900
106	502,576.388100	2,263,425.422000
107	502,576.708700	2,263,425.334700
108	502,577.022800	2,263,425.226300
109	502,577.328900	2,263,425.097200
110	502,577.625800	2,263,424.948100
111	502,578.034400	2,263,424.725700
1	502,577.598700	2,263,423.925500

POLÍGONO 3

Superficie (2-10-05.93 hectáreas)

Vértice	X	Y
1	502,403.233900	2,263,518.965200
2	502,404.840900	2,263,518.089100
3	502,405.235800	2,263,518.814400
4	502,525.995900	2,263,453.060500
5	502,526.282300	2,263,452.891900
6	502,526.556800	2,263,452.704800
7	502,526.818300	2,263,452.499800
8	502,527.065500	2,263,452.277900
9	502,527.297600	2,263,452.040100
10	502,527.513300	2,263,451.787400

Vértice	X	Y
11	502,527.711700	2,263,451.520900
12	502,527.892100	2,263,451.241800
13	502,528.053500	2,263,450.951400
14	502,528.195200	2,263,450.650900
15	502,528.316700	2,263,450.341700
16	502,528.417400	2,263,450.025100
17	502,528.496900	2,263,449.702500
18	502,528.554700	2,263,449.375300
19	502,528.590800	2,263,449.045000
20	502,528.819400	2,263,446.975700



Vértice	X	Y
21	502,529.190900	2,263,444.927100
22	502,529.703500	2,263,442.909300
23	502,530.354800	2,263,440.931800
24	502,531.141500	2,263,439.004300
25	502,532.059900	2,263,437.135900
26	502,532.208600	2,263,436.834300
27	502,532.336600	2,263,436.523300
28	502,532.443500	2,263,436.204500
29	502,532.528700	2,263,435.879200
30	502,532.591800	2,263,435.548900
31	502,532.632600	2,263,435.215100
32	502,532.650900	2,263,434.879400
33	502,532.646500	2,263,434.543100
34	502,532.619600	2,263,434.207900

Vértice	X	Y
35	502,532.570200	2,263,433.875300
36	502,532.498500	2,263,433.546800
37	502,532.404900	2,263,433.223800
38	502,532.289900	2,263,432.907800
39	502,532.153800	2,263,432.600300
40	502,531.997400	2,263,432.302600
41	502,531.821300	2,263,432.016200
42	502,531.626400	2,263,431.742200
43	502,452.399700	2,263,327.947500
44	502,327.722700	2,263,422.884800
45	502,402.205400	2,263,520.464400
46	502,403.628400	2,263,519.689600
1	502,403.233900	2,263,518.965200

POLÍGONO 4**Superficie (1-00-80.78 hectáreas)**

Vértice	X	Y
1	502,376.213700	2,263,369.620900
2	502,444.512000	2,263,317.613800
3	502,378.708200	2,263,231.404500
4	502,378.487100	2,263,231.135000
5	502,378.247700	2,263,230.881500
6	502,377.991200	2,263,230.645400
7	502,377.718900	2,263,230.427700
8	502,377.432100	2,263,230.229400
9	502,377.132200	2,263,230.051700
10	502,376.820700	2,263,229.895200
11	502,376.499000	2,263,229.760800
12	502,376.168700	2,263,229.649200
13	502,375.831500	2,263,229.560800
14	502,375.488900	2,263,229.496200
15	502,375.142600	2,263,229.455500
16	502,374.794400	2,263,229.439100
17	502,374.445900	2,263,229.446900
18	502,374.098700	2,263,229.479000

Vértice	X	Y
19	502,373.754600	2,263,229.535300
20	502,371.985400	2,263,229.829500
21	502,370.200900	2,263,230.010100
22	502,368.408500	2,263,230.076200
23	502,366.615600	2,263,230.027600
24	502,366.292500	2,263,230.018900
25	502,365.969400	2,263,230.031200
26	502,365.647900	2,263,230.064200
27	502,365.329100	2,263,230.118000
28	502,365.014500	2,263,230.192300
29	502,364.705400	2,263,230.286700
30	502,364.403000	2,263,230.400900
31	502,364.108600	2,263,230.534400
32	502,363.823400	2,263,230.686600
33	502,363.548700	2,263,230.856900
34	502,363.285500	2,263,231.044600
35	502,305.355100	2,263,275.262800
36	502,306.023200	2,263,276.138000



Vértice	X	Y
37	502,305.346600	2,263,276.653700
38	502,341.327400	2,263,323.855300
39	502,342.744800	2,263,322.774900
40	502,344.451100	2,263,325.013300
41	502,343.033400	2,263,326.094000

Vértice	X	Y
42	502,363.759100	2,263,353.283000
43	502,365.151500	2,263,352.221700
44	502,366.287800	2,263,353.712300
45	502,364.895800	2,263,354.773400
1	502,376.213700	2,263,369.620900

**Zona Núcleo
Cenote Aerolito
Superficie (3-62-42.44 hectáreas)**

Vértice	X	Y
1	502,250.562867	2,263,009.011090
2	502,209.677636	2,263,009.002040
3	502,213.316351	2,263,060.194740
4	502,241.084041	2,263,104.310860
5	502,224.510734	2,263,156.258460
6	502,230.323483	2,263,163.883920
7	502,231.108999	2,263,163.208000
8	502,231.629999	2,263,163.915000
9	502,230.855312	2,263,164.581600
10	502,259.968129	2,263,202.773320
11	502,287.345028	2,263,238.688400
12	502,340.561858	2,263,198.068810
13	502,341.602340	2,263,193.553650
14	502,343.373189	2,263,189.271910
15	502,345.825912	2,263,185.340820
16	502,348.893342	2,263,181.868060
17	502,352.491481	2,263,178.948700
18	502,356.521797	2,263,176.662700
19	502,360.873924	2,263,175.072650
20	502,365.428682	2,263,174.222100
21	502,370.061343	2,263,174.134340
22	502,374.645047	2,263,174.811770
23	502,379.054272	2,263,176.235850
24	502,379.351324	2,263,176.348830
25	502,379.481757	2,263,175.504260

Vértice	X	Y
26	502,381.256637	2,263,175.776220
27	502,381.145428	2,263,176.618570
28	502,381.913378	2,263,176.533320
29	502,382.659024	2,263,176.330780
30	502,383.364561	2,263,176.015770
31	502,384.013138	2,263,175.595810
32	502,455.063716	2,263,121.362580
33	502,442.037946	2,263,106.221540
34	502,434.804906	2,263,112.439400
35	502,428.285922	2,263,104.856330
36	502,435.516267	2,263,098.640790
37	502,325.243943	2,262,970.461200
38	502,270.447932	2,263,017.585360
39	502,258.069063	2,263,009.324650
1	502,250.562867	2,263,009.011090

La zona de amortiguamiento total corresponde a los polígonos 2, 3 y 4, así como el polígono 1 restando la zona núcleo Cenote Aerolito.



4) REPORTE DE CAMPO

El 23 de marzo de 2023, personal de la Dirección General de Conservación en coordinación con la Dirección Regional Península de Yucatán y Caribe Mexicano y del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, realizaron un recorrido de campo para el reconocimiento de elementos de conservación (Figura 67), identificación de la vegetación y registro de biodiversidad (Figura 68) en los ecosistemas aledaños a la entrada del cenote El Aerolito en Cozumel.



Foto: Archivo CONANP

Figura 67. Recorrido en campo por parte de personal de la CONANP en la propuesta de APFF Cenote Aerolito, para identificar objetos de conservación adyacentes al cenote y registro de biodiversidad.



Foto: Archivo CONANP

Figura 68. Identificación de asociaciones vegetales y especies en la poligonal de la propuesta de APFF Cenote Aerolito en Cozumel, Quintana Roo.





5) FOTOGRAFÍAS DE ESPECIES Y ECOSISTEMAS

