

## Capítulo 8 Biodiversidad y vulnerabilidad de Playa del Carmen ante el incremento del nivel medio del mar

### Chapter 8 Biodiversity and vulnerability of Playa del Carmen due to the rise of the mean sea level

RUIZ-RAMÍREZ, Jennifer D.†\*, GUTIÉRREZ-AGUIRRE, Martha A. y FRAUSTO-MARTÍNEZ, Óscar.

*Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingenierías y División de Desarrollo Sustentable*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Jennifer D. Ruiz-Ramírez* / **ORC ID:** 0000-0001-8429-9473, **CVU CONACYT ID:** 96579

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Martha A. Gutiérrez-Aguirre* / **ORC ID:** 0000-0002-9329-820X, **CVU CONACYT ID:** 25926

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Oscar, Frausto-Martínez* / **ORC ID:** 0000-0002-6610-5193, **CVU CONACYT ID:** 288309

**DOI:** 10.35429/H.2020.9.95.106

J. Ruiz, M. Gutiérrez y O. Frausto

jenifer@uqroo.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Biología. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

## Resumen

El aumento del nivel del mar es un tema preocupante porque se estima que cerca de 600 millones de personas viven en zonas costeras de menos de 10 m de altura sobre el nivel del mar. México es un país costero que cuenta con una biodiversidad terrestre y acuática muy importante, la cual es rica en endemismos, si a eso sumamos su exposición a los huracanes y al aumento del nivel medio del mar, es lógico que se trabaje de forma multidisciplinaria acerca de su vulnerabilidad ante el cambio climático. Por ello, se eligió la ciudad de Playa del Carmen, conocida como el corazón de la Riviera Maya en el Caribe Mexicano para conocer su vulnerabilidad ante el aumento del nivel del mar, combinado con la biodiversidad acuática de los cenotes que la rodean. Los resultados arrojan una superficie de 19,281 m<sup>2</sup> que sería afectada ante un escenario de inundación a 1 m, que equivale a una pérdida en USD\$ 77 millones; aunado a la existencia de 27 especies de crustáceos y peces que habitan en los cenotes, de los cuales 13 son endémicas. Se concluye que el desarrollo de planes de gestión para adaptar y mitigar el impacto del aumento del nivel del mar en Playa del Carmen requerirá la inclusión de soluciones de ingeniería para proteger la infraestructura en áreas urbanas y turísticas; establecer como prioridad la conservación y restauración de los hábitats naturales, así como la creación urgente de un ANP que incluya la conservación de los cenotes como cuerpos acuíferos, previendo su salinización, y por ende sus especies endémicas, que elevan aún más la biodiversidad del país.

## Adaptación, Acuífero, Cambio climático, Ecología, Caribe mexicano

### Abstract

Sea level rise is a matter of concern because an estimated 600 million people live in coastal areas less than 10 m above sea level. Mexico is a coastal country that has a very important terrestrial and aquatic biodiversity, which is rich in endemic species, if we add to that its exposure to hurricanes and the increase in the mean sea level, it is logical to work in a multidisciplinary way about of their vulnerability to climate change. For this reason, the city of Playa del Carmen, known as the heart of the Riviera Maya in the Mexican Caribbean, was chosen to learn about its vulnerability to rising sea levels, combined with the aquatic biodiversity of the cenotes that surround it. The results show an area of 19,281 m<sup>2</sup> that would be affected in a 1 m flood scenario, which is equivalent to a loss of USD \$ 77 million; coupled with the existence of 27 species of crustaceans and fish that inhabit the cenotes, of which 13 are endemic. It is concluded that the development of management plans to adapt and mitigate the impact of the sea level rise in Playa del Carmen will require the inclusion of engineering solutions to protect the infrastructure in urban and tourist areas; establishing as a priority the conservation and restoration of the natural habitats, as well as the urgent creation of an ANP that includes the conservation of the cenotes as aquifer bodies, anticipating their salinization, and therefore their endemic species, which further elevate the country's biodiversity.

## Adaptation, Aquifer, Climate change, Ecology, Mexican Caribbean

### 8. Introducción

A nivel global, el interés de los estudios sobre el aumento del nivel del mar (SLR, por siglas en inglés) se ha enfatizado en la relación que guarda con el uso costero acelerado (Bi, *et al.*, 2013), en ofrecer opciones de adaptación para ciudades costeras turísticas (Cooper & Lemckert, 2012), y en estimar la extensión espacial susceptible de inundación costera (Kuhn, *et al.*, 2011).

Se estima que cerca de 600 millones de personas vive en una franja costera de menos de 10 m de altura sobre el nivel del mar (McGranahan, *et al.*, 2007) y más de la mitad de la población mundial vive dentro de una franja de 100 km de la línea de costa y se prevé que para el año 2025 el 75% de la población mundial podría habitar en las zonas costeras y en el 2050 alcance una concentración de 9.6 billones de personas (FAO, 2014; Azuz-Adeath y Rivera-Arriaga, 2002).

En México, menos de una cuarta parte de la población vive en las costas, dedicándose a actividades económicas primarias; sin embargo, la dinámica económica del país ha cambiado, y algunas ciudades dedicadas al sector primario, se han convertido al secundario o terciario, por lo que han aumentado las ciudades turísticas, favoreciendo el aumento en el crecimiento urbano y la migración hacia esos centros (León, 2004).

Si este cambio y el proceso se realiza de manera desordenada, causa impactos en las estructuras socioeconómicas y culturales de las poblaciones, la dinámica productiva destruye dunas, manglares y humedales debido a los procedimientos de construcción de proyectos públicos y privados mal planeados y mal ubicados, por las actividades de dragado y relleno, conversión y debilitamiento de playas y dunas propiciando mayor erosión por acción del oleaje, y las interferencias con los patrones normales del traslado de arena por las corrientes marinas (Casco-Montoya, 2004). Esta expansión en las zonas costeras ya es una realidad y ha producido cambios importantes en los usos de suelo, la pérdida de vegetación y la fragmentación de importantes ecosistemas (Zárate-Lomelí, 2004; Flores-Verdugo, *et al.*, 2010; Silva-Casarín, *et al.*, 2012).

Uno de los estados que se dedica fuertemente a la actividad turística es Quintana Roo, el cual es bañado por las aguas del Mar Caribe, posee un litoral que se extiende por 1,176 km, lo que representa el 10.6% del total nacional (INEGI, 2015), sus espacios costeros todavía ofrecen oportunidades de aprovechamiento de largo plazo si se establece una planificación adecuada. Su belleza natural incluye porciones de selva, manglares, lagunas costeras, playas y vegetación de duna costera que están fuertemente ligadas a los arrecifes de coral y los pastos marinos (Hirales-Cota, *et al.*, 2010; INEGI, 2015; Vázquez-Botello, 2008). La biodiversidad se encuentra decretada en 11 Áreas Naturales Protegidas (ANP's), con una superficie total de 312,864.672 ha, de las cuales 90.91% son de competencia estatal y 9.09% son de competencia municipal, con el propósito de proteger diferentes ecosistemas (CONACYT, 2018; Ruiz Ramírez, *et al.*, 2018).

A lo largo del litoral se extiende una delicada franja de playas arenosas, bañadas por aguas transparentes y protegida por una cadena discontinua de arrecifes que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (la segunda más larga del mundo, con aproximadamente 600 km), la cual se asienta sobre una plataforma continental muy angosta que bordea la costa de la región, un extremo se ubica al noroeste de la Península de Yucatán y el otro extremo hasta el límite sur del Golfo de Honduras (Álvarez-Filip, 2015; Alva-Basurto y Arias-González, 2015; Blanchon, *et al.*, 2010). También se destaca el gran número de áreas naturales protegidas decretadas, y con el mayor número de ordenamientos ecológicos del territorio instrumentados por Entidad (Guido-Aldana, *et al.*, 2009; SECTUR, 2013a).

Sin embargo, el aumento del nivel del mar (ANM) debe ser un tema de alta prioridad para las zonas costeras del Caribe Mexicano donde el turismo domina la economía local y, por ende, la belleza natural que viene a visitar. El IPCC (2014) señala que la vulnerabilidad de un sistema costero (de menos de 10 m de elevación) al aumento del nivel del mar depende de la sensibilidad, la exposición y la capacidad de adaptación de los sistemas naturales y humanos (Campos-Cámara, 2011; IPCC, 2014; Wong, *et al.*, 2014). El escenario a 1m de elevación de ANM para el año 2100, se considera entre los más comúnmente abordados por el IPCC y estudios regionales para el Mar Caribe señalan que podría ser aún más del metro para el mismo año (CEPAL, 2012; Jevrejeva, *et al.*, 2012; Meinshausen, *et al.*, 2011; Rahmstorf, 2007; Schewe, *et al.*, 2011).

Este capítulo se enfoca en analizar la vulnerabilidad de la ciudad de Playa del Carmen, desde el punto de vista urbano turístico y su biodiversidad acuática de los cenotes; ambos expuestos ante el aumento del nivel del mar, resaltando que en este municipio no existe decretada aún un ANP.

## 8.1 Área de Estudio

La ciudad de Playa del Carmen se ubica en el sector oriental de la península de Yucatán, en la región hidrológica RH33. Comprende el litoral y zona próxima a la costa, en un lecho rocoso calizo altamente permeable debido al proceso de karstificación, el cual se refleja en la formación de sistemas de cavernas subterráneas, y una densidad de poljes, úvalas y dolinas. Asimismo, es una zona de contraste altitudinal menor a 20 metros, pero con lineamientos de terrazas y cordones litorales relictos de trasgresión marina. Lo anterior imprime un microrelieve caracterizado de terrazas y flancos abruptos, zonas de deficiente drenaje y sistemas de playas bajas arenosas típicas del norte de Quintana Roo.

El área de estudio se ubica en el noreste del estado de Quintana Roo, entre los municipios de Tulum, Puerto Morelos y José María Morelos. El municipio de Solidaridad tiene un área de 2205 km<sup>2</sup> y una extensión de litoral de 80 km, altamente densificado. En específico, la ciudad de Playa del Carmen, es la cabecera del municipio de Solidaridad, Quintana Roo, localizado al sureste de México, y al sur de Cancún; se ubica en las coordenadas 20°38'19" N y 87°05'01" O.

Su principal actividad económica es el turismo, generando empleos en la industria de la construcción y de servicios. Es la ciudad central de la Riviera Maya; entre su población residente se encuentran extranjeros (SECTUR, 2013b).

La ciudad costera de Playa del Carmen, que también es conocida como el corazón de la Riviera Maya, es un atractivo destino turístico de sol y playa; su oferta hotelera es mayor a la de Cancún, al tener 44,000 habitaciones (10,000 más que Cancún); sus visitantes provienen de Estados Unidos, Canadá y Europa; y su derrama económica anual, supera los USD\$ 8,000 millones (APIQROO, 2018; Góchez, 2015; Ruiz Ramírez, et al., 2018; SEDETUR, 2017).

## 8.2 Características físico-geográficas de solidaridad – Riviera Maya

Actualmente el Municipio de solidaridad colinda al norte con el municipio de Puerto Morelos, al noroeste con el municipio de Lázaro Cárdenas; al este con el Mar Caribe y el municipio de Cozumel; y al sur con el municipio de Tulum (H. Gobierno Municipal de Solidaridad, 2013; SECTUR-Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2016). Tiene una población aproximada de 234,613 habitantes (CONAPO, 2019).

Como la mayor parte de la Península de Yucatán, el territorio de Solidaridad es una plataforma carbonatada plana, con un ligero declive hacia el mar a manera de terrazas, barras y playas bajas arenosas. El municipio se encuentra sobre una planicie de origen tectónico, las máximas elevaciones son inferiores a los 25 metros sobre el nivel del mar. Estas elevaciones disminuyen hacia la zona de la costa. La altitud media del municipio de Solidaridad sobre el nivel del mar es de 10 metros. Esta plataforma se encuentra densamente kárstificada (Frausto, et al. 2018), con presencia de dolinas, úvalas y poljes, lo cual le imprime un carácter irregular a su relieve que se manifiesta en zonas de deficiente drenaje (Figura 1).

### Figura 1. Litología, principales estructuras geológicas y depresiones kársticas.

El clima del Municipio de Solidaridad es AX'(w2)iW'' de cálido subhúmedo con lluvias en el verano, con una temperatura media anual de 26°C; la temperatura máxima promedio es de 33°C, presente en los meses de abril a agosto, la temperatura mínima promedio es de 17°C en el mes de enero. Por su parte la precipitación media anual es alrededor de 1300 mm, la lluvia está presente durante todo el año, pero es más abundante de junio a octubre (Chimal, 2015). De acuerdo con el análisis de huracanes en la región, ésta se encuentra en la zona de mayor recurrencia de la península, afectando centros urbanos como Cancún, Cozumel, Playa del Carmen y Puerto Morelos, con un nivel de peligro extremo de impacto. Por otra parte, se presentan los llamados nortes entre los meses de octubre a enero, producto del choque de las masas frías del norte con el aire tropical del país que ocasiona la lluvia invernal y que en algunos años llega a ser tan elevada que abarca más del 15% del total anual (Ihl y Frausto, 2014).

Esta zona forma parte de la Región/Cuenca Hidrológica RH32 conocida como Yucatán Norte. La roca caliza, sumamente permeable, que forma el suelo de esta región no permite la existencia de corrientes de aguas superficiales. Por ello, se cuenta con innumerables depresiones kársticas inundadas conocidas localmente como "cenotes", en la mayor parte de los casos, evidencian complejas redes fluviales subterráneas, que en ocasiones se abren paso hasta el mar. La profundidad de los acuíferos varía de 5 a 10 metros, pero también existen de 1 metro con un espesor promedio de 19 metros. Los tipos de aguas predominantes son las sódicocloruradas y clorurada-sulfatada-sódica (H. Ayuntamiento de Solidaridad, 2016).

Los suelos en gran parte de la zona costera de la Riviera Maya son generalmente más pobres que los del resto de la Península; son también más jóvenes y poco evolucionados, pedregosos, someros, fácilmente degradables y con potencial forestal. Dichos suelos corresponden a los tipos litosol y rendzina con clase textural media. El subsuelo está íntegramente formado por calizas blancas, arenosas, no mineralizadas llamadas sascab, que por intemperismos se endurecen y forman placas en la superficie conocidas como lajas. La formación de un horizonte arcilloso es común en los suelos antiguos, horizonte que aflora cuando las quemadas o la intemperie destruyen la capa de suelo negro, dando lugar a los suelos rojos de tipo chac-luum o k'ankab.

Ambos suelos son deficientes en manganeso y potasio. Solamente en los suelos bajos, y debido al arrastre coluvial desde zonas más altas, se forman suelos profundos, pero de textura muy fina y, por lo tanto, inundables y pesados, llamados ak'alches, que pueden secarse y agrietarse durante la época de secas. Los suelos inundables de las marismas y humedales, tipo margas o de turbera, descansan igualmente sobre la roca calcárea y han sido poco estudiados (Figura 2). (SECTUR-Gobierno del Estado de Quintana Roo 2011-2016, 2013). Una de las características de esta zona es la gran diferenciación edáfica en los ambientes kársticos palustres y costeros, los cuales muestran gran variabilidad espacial de geoformas, suelos y formaciones vegetales (Fragoso, et al. 2020).

**Figura 2.** Principales tipos de suelos.

La selva baja perennifolia y el manglar son la vegetación primaria representativa, altamente modificada y cuya evidencia es la vegetación secundaria arbórea y arbustiva. El uso del suelo se asocia a la agricultura de temporal, pastizal cultivado, así como la expansión de la mancha urbana de la costa hacia el interior, y a lo largo del litoral, del territorio municipal. Se reconocen los cuerpos de agua temporales con una extensión significativa de terrenos sujetos a inundación (Figura 3).

**Figura 3.** Vegetación y uso del suelo.

### **8.3 Características de la biodiversidad acuática del Municipio de Solidaridad**

El dominio de suelo joven y de origen orgánico en la región, propicia el colapso de bóvedas terrígenas a través de la interconexión de corrientes subterráneas que, por la influencia marítima, forman ambientes distintos entre sí y altamente variables, tanto en una escala temporal, como espacial.

La variabilidad ambiental en estos ecosistemas se genera por los cambios en la concentración salina (como producto de los flujos de agua desde el interior del continente hacia el mar o viceversa), los cambios en los gradientes de profundidad y la interconexión (o falta de) entre las corrientes subterráneas y los sistemas superficiales.

Con estas condiciones, se generan los ecosistemas acuáticos dominantes en el municipio de Solidaridad, Quintana Roo, los cuales son conocidos como anquihalinos, troglobios, dulceacuícolas y oligohalinos (Álvarez e Iliffe, 2008).

En este tipo de ambientes, los organismos dominantes por su diversidad y distribución son los peces y crustáceos. Estos organismos acuáticos han sido los más frecuentemente estudiados y son importantes ecológicamente, debido a que, por los inventarios existentes hasta hoy, muestran un alto grado de endemismo.

### **8.4 Método**

Para obtener las áreas susceptibles de inundación por aumento del nivel del mar, se utilizaron:

### **8.5 Datos del Modelo Digital de Elevación del terreno**

Los modelos digitales de elevación (MDE) provienen de mediciones LiDAR de tipo terreno en formato cartográfico en escala 1: 10, 000 con resolución de 5 m. obtenidos a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); los MDE están referenciados al Datum Horizontal Marco de Referencia Terrestre Internacional de 1992 Época 1988 (ITRF92) y al Elipsoide Sistema de referencia geodésico 1980; y disponibles en [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) (previa solicitud). Se importaron y analizaron con el programa TNT mips profesional para caracterizar las condiciones locales del terreno.

## 8.6 Datos de la superficie urbanizada e infraestructura

Se seleccionó una imagen de Google Earth para la ciudad de Playa del Carmen. La imagen de Color Verdadero fue descompuesta en sus componentes RGB para ser utilizadas en un proceso de clasificación no supervisado (Smith 2006). Se utilizó el algoritmo K-means (Tso y Mather, 2009) para generar 8 clases del terreno y agrupar de forma visual en una imagen binaria (1, 0) que muestra las áreas urbanizadas e infraestructura turística (clase 1) mientras que se omite vegetación, cuerpos de agua y tierra expuestos (clase 0). El área urbanizada se segmentó según el MDE en tres zonas de elevación: 1)  $> 0\text{m}$  a  $\leq 1\text{m}$ , 2)  $> 1\text{m}$  a  $\leq 2\text{m}$  y 3)  $> 2\text{m}$  a  $\leq 3\text{m}$  y en cada zona se calculó el área total de la infraestructura ( $\text{m}^2$ ).

Una vez definida la superficie, se realizó una búsqueda en internet de las páginas inmobiliarias, seleccionando aquellas que tuvieran frente de playa, y que se localizaran a lo largo de la costa. Para averiguar el valor promedio de bienes raíces (dólares por  $\text{m}^2$ ) en cada sitio de estudio, se determinaron precios promedio de venta por metro cuadrado de las propiedades (sin considerar la inflación). Este enfoque puede utilizarse para desarrollar indicadores de actividad económica (McLaren y Shanbhogue, 2011) y desarrollar herramientas que ayuden a pronosticar los precios de la vivienda y las ventas (Wu y Brynjolfsson, 2015). Para evaluar los impactos económicos de los sitios debido a un posible riesgo de inundación, se consideraron las áreas susceptibles que los MDE revelaron de 1 a 3 m de elevación.

Finalmente, se expusieron los escenarios de inundación de 1 a 3 m, estimando los valores de las propiedades. Las estimaciones de inundación no incluyeron los procesos sedimentarios debido a la dinámica costera.

## 8.7 Datos de la geoposición de las especies.

Se recopilaron datos para definir los puntos (georreferencia) en que se ha registrado de la fauna dominante en los sistemas acuáticos del Municipio de Solidaridad, considerando revisiones recientes (Álvarez e Iliffe, 2008; Álvarez, Iliffe, Benítez, Brankovits y Villalobos, 2015; Gamboa-Pérez, 1992)

Posteriormente, para el desarrollo de la cartografía de las especies de crustáceos y peces se migró la base de datos descriptiva al sistema de información geográfica ArgGis 10.4., con lo anterior se reconocieron las relaciones espaciales de distribución vinculando los terrenos sujetos a inundación, depresiones y altitud. Asimismo, su ubicación con respecto a la línea de costa. Se diferenciaron los mapas de distribución en las dos categorías de análisis (crustáceos y peces).

## 8.8 Resultados

### 8.9 Aumento del nivel del mar para la región del Mar Caribe

El aumento del nivel del mar en las costas se reconoce como uno de los resultados más directos del calentamiento global. En los últimos 100 años, se ha incrementado en promedio de 1 a 2 mm por año y se anticipa que esas tasas se acelerarán en las próximas décadas (Hernández Arana, 2007). Para la región del Mar Caribe, se encontró una tasa promedio de  $2.0 \text{ mm}^{-1}$ , con datos obtenidos de la serie de tiempo 1993-2013 de los altímetros TOPEX/Poseidón, Jason-1 y OSTM/Jason-2 (Ruiz-Ramírez et al., 2014). Sin embargo, esta tendencia va en aumento pues al analizar la serie de tiempo de 1993-2014 la tasa registraba  $2.3 \text{ mm}^{-1}$  y la serie de tiempo de 1993-2015 registró una tasa de  $2.8 \text{ mm}^{-1}$  (Ruiz Ramírez, et al., 2018).

### 8.10 Elevaciones

En el Modelo Digital de Elevación (MDE) se observan altitudes medias (msnm) de 6 m para Playa del Carmen. El perfil topográfico señalado en la imagen con las letras A y B (Línea de Costa) revela una zona contigua marina de alrededor de 500 m de longitud con una altura menor a 3 m de elevación. A partir de los 500 m de la línea de costa, se inicia una elevación del terreno que supera los 8 m de altura y se extiende hasta cerca de 1 km de distancia (Fig. 4).

**Figura 4.** Perfil topográfico del terreno en Playa del Carmen para el transecto resaltado en el recuadro.

### 8.11 Costos de infraestructura

Los costos por metro cuadrado de construcción, se reporta como el costo promedio neto de construcción, ya que si el desarrollo inmobiliario posee ciertos atributos (tipo de piso, muebles, accesorios de marca o de algún arquitecto de renombre), los costos se triplican o quintuplican. En el mercado de bienes raíces de 2016, Playa del Carmen tenía un costo por metro cuadrado ( $m^2$ ) de construcción de USD\$ 4,000 por  $m^2$ .

### 8.12 Vulnerabilidad ante el incremento del nivel del mar

La población permanente en la costa representa el 67.6% del total de la población del estado de Quintana Roo, principalmente por las necesidades de mano de obra relacionadas con las actividades económicas destinadas al turismo. Sin embargo, Playa del Carmen es la segunda localidad más poblada del estado con 234,613 habitantes, pero con un ritmo de crecimiento poblacional mayor al de Cancún. El riesgo para la infraestructura ante los fenómenos hidrometeorológicos y de aumento del nivel del mar se incrementa por la topografía relativamente plana de la Península de Yucatán y su poca elevación sobre el nivel del mar. Estas características de la zona y las alteraciones al sistema duna-playa han ocasionado desde el 2006, el vertimiento de arena en dos ocasiones, con el fin de rellenar las playas (Martell-Dubois, *et al.*, 2012), considerando un costo anual actual por metro cúbico ( $m^3$ ) de USD\$ 10 (Mariño-Tapia, *et al.*, 2012) que podría incrementarse sustancialmente por la demanda de sitios y la reducción de bancos de arena cercanos a las islas de Mujeres y Cozumel. Bajo este escenario general, para Playa del Carmen y Quintana Roo, la vulnerabilidad se incrementa principalmente por: 1) el crecimiento de la población y de la infraestructura costera; 2) el posible aumento de frecuencia e intensidad de los huracanes en corto plazo; y 3) por el incremento del nivel del mar a un largo plazo.

Las superficies afectadas en infraestructura por metro cuadrado, varía según el escenario estimado del nivel medio del mar. Tomando el escenario a 1 m de elevación, Playa del Carmen cuenta con una superficie de 19,281  $m^2$ , que sería afectada, con un valor estimado de USD\$ 77 millones, marcado en color rojo (Tabla 1, Fig. 5). El escenario a 2m de elevación, afectaría a una superficie 64,649  $m^2$ , con un valor estimado de USD\$ 258 millones, marcado en amarillo. El escenario a 3m de elevación afectaría a una superficie de 90,895  $m^2$  con un valor estimado de USD\$ 363 millones, marcado en verde. Cabe mencionar que la estimación de la superficie en infraestructura afectada no considera los posibles niveles de construcción, ni mobiliario o equipos; y cabe recordar que las intervenciones de vertimientos de arena en sus playas se están convirtiendo en una constante para mantener atractivas las actividades económicas.

**Tabla 1.** Superficie de afectación con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE)

**Figura 5.** Playa del Carmen, resaltando la infraestructura marcada en rojo para 1 m, en amarillo para 2 m y en verde para 3 m, de elevación.

Cabe resaltar que esta ciudad turística y su infraestructura hotelera están ubicadas en áreas de posible inundación permanente por el incremento del nivel del mar y se esperaría que las medidas de adaptación futura, considere implementar estrategias locales acordes a sus características particulares.

### 8.13 Biodiversidad

Probablemente, alrededor de 27 especies que a la fecha han sido registradas en los sistemas acuáticos del Municipio de Solidaridad (Tabla 2; Figs. 5 y 6) se verían afectadas con los cambios en el nivel del mar en el municipio. Aunque aún se desconocen las estrategias adaptativas precisas que cada especie podría enfrentar con un incremento en el nivel del mar (porque la gran mayoría de las especies registradas en la región se han descrito recientemente y se desconoce su biología básica) muy probablemente aquellas con escasa capacidad de tolerar cambios ambientales como producto de las fluctuaciones en la salinidad (estenohalinas), serán las más vulnerables.

**Tabla 2.** Inventario de crustáceos y peces habitantes de sistemas acuáticos del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo, México. Las señaladas con un asterisco, se consideran especies endémicas.

**Figura 6.** Crustáceos y peces habitantes de sistemas acuáticos del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo, México.

Para el municipio de Solidaridad está planteado en un futuro que se decrete un “Área de Protección Especial”, que está contemplado en el Programa de Desarrollo Urbano de Playa del Carmen (2010), con el propósito de que exista un ANP que brinde servicios ambientales. En la actualidad se cuenta con un reglamento municipal que promueve la protección de las actividades en cenotes, cuevas y grutas, siendo una de ellas la exploración, el desarrollo de actividades de conservación y protección (Gobierno de Quintana Roo, 2017).

#### 8.14 Agradecimiento

La primera autora agradece la beca PRODEP otorgada a través de la Universidad de Quintana Roo (UQROO) para sus estudios de doctorado en el CINVESTAV-Unidad Mérida.

#### 8.15 Conclusiones

Este capítulo evaluó la vulnerabilidad de la ciudad turística de Playa del Carmen y su biodiversidad acuática de sus principales cenotes, ante el aumento del nivel del mar. La evaluación económica, considerando los costos de construcción, revela que la ciudad de Playa del Carmen es vulnerable a los escenarios de ANM a 1, 2 y 3 m con un impacto económico de USD \$ 77, USD\$ 258 y USD \$ 363 millones, respectivamente; siendo la baja elevación, la extensa infraestructura turística y el valor inmobiliario los que contribuyen a esta vulnerabilidad.

El impacto económico colectivo a un m de ANM, en un escenario esperado en este siglo, es de USD \$ 77 millones; las estimaciones utilizando costos de construcción pueden ayudar a determinar el impacto económico de las inundaciones para establecer una lista de prioridades por atender para mitigar el impacto socioeconómico ante escenarios de cambio climático.

La vulnerabilidad de las regiones costeras del Caribe mexicano ante el ANM apenas comienza a vislumbrarse a través de las pérdidas económicas que han sufrido las inversiones en la zona costera después de los desastres naturales en las últimas dos décadas, aunado a las tasas de crecimiento de la población local y regional y la creciente demanda de infraestructura, que indica la necesidad de futuras inversiones a medida que aumenta también el número de visitantes.

El desarrollo de planes de gestión para adaptar y mitigar el impacto del ANM en Playa del Carmen requerirá la inclusión de soluciones de ingeniería (carreteras elevadas, construcción en áreas elevadas, construcción de muelles alternos); enfocarse en zonas no desarrolladas para limitar el desarrollo turístico y urbano en zonas de alto riesgo; proteger la infraestructura en áreas urbanas y turísticas, establecer como prioridad la conservación y restauración de los hábitats naturales (vegetación de dunas costeras, humedales y sistemas arrecifales), que funcionan como barreras físicas y amortiguadores; así como la creación urgente de un ANP que incluya la conservación de los cenotes como cuerpos acuíferos, previniendo su salinización, y por ende sus especies endémicas, que elevan aún más la biodiversidad del país.

Cualquier programa de adaptación debe ir ligado a la difusión de información para integrar a la sociedad y a los usuarios sobre la importancia del mantenimiento de los servicios ambientales, incorporando también programas de prevención de descarga de contaminantes al subsuelo, manejo de residuos sólidos y monitoreo en la calidad del agua.

#### 8.16 Referencias

Alva-Basurto J. C. y Arias-González, J. E. (2015). Arrecifes de coral, servicios ecosistémicos y cambio climático. *La Jornada ecológica*. 199, 5-6.

- Álvarez, F. y Iliffe, T. (2008). Fauna anquihalina de la península de Yucatán. En F. Álvarez y G. Rodríguez-Almaraz (Eds.), *Crustáceos de México: Estado Actual de su Conocimiento* (pp 379-418). Monterrey, Nuevo León: Dirección de Publicaciones Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Álvarez, F. Iliffe, T. Benítez, S. Brankovits, D. y Villalobos, J. (2015). New records of anchialine fauna from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Check List the journal of biodiversity data*, 10, 1505.
- Álvarez Filip, L. (2015). El arrecife mesoamericano, un paraíso que pelagra por su belleza. *La Jornada ecológica*, 199, 3-4.
- APIQROO. (2018). Cozumel se coloca, por segundo año consecutivo, como líder en la industria de cruceros en México y Centroamérica. Administración Portuaria Integral de Quintana Roo S.A. de C.V. Gobierno del Estado de Quintana Roo 2016-2022. Recuperado el día 17, septiembre, 2018, de <http://www.apiqroo.com.mx/cozumel-se-coloca-por-segundo-ano-consecutivo-como-lider-en-la-industria-de-cruceros-en-mexico-y-sudamerica/>.
- Azuz Adeath, I. y Rivera Arriaga, E. (ed.). (2002). Resultados del Seminario/Taller La sustentabilidad costera. Comité Nacional Preparatorio para la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, Johannesburgo. Campeche: Editorial Departamento de difusión y publicaciones, Centro EPOMEX, Universidad de Campeche
- Bi, X., Q. Lu y Pan, X. (2013). Coastal use accelerated the regional sea-level rise. *Ocean & Coastal Management*, 82, 1-6
- Blanchon, P., R. Iglesias-Prieto, E. Jordán Dahlgren y Richards, S. (2010). Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (Ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (p. 229-248). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL.
- Campos Cámara, B.L. (2011). Presión turística y urbanística: vulnerables al cambio climático en el Caribe mexicano. *Quivera*, 13 (2), 1-13
- Casco Montoya, R. (2004). La zona costera de México: definición. En: Rivera Arriaga, E., G.J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (Eds.). 2004. *El Manejo Costero en México* (pp. 1-4). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- CEPAL. (2012). Efectos del Cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Riesgos. Organización de Naciones Unidas – CEPAL.
- Chimal, A. (2015). Análisis del clima en el norte de Quintana Roo y su prospección en el contexto de la variabilidad climática. Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México.
- CONACYT. (2018). Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo. Recuperado el 23, mayo, 2018, de <http://conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/anpl/quintana-roo>
- CONAPO. (2019). Proyecciones de la Población de los municipios de México, 2015-2030. Consejo nacional de población – Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/es/articulos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030-215756?idiom=es>
- Cooper, J.A.G. y Lemckert, C. (2012). Extreme sea-level rise and adaptation options for coastal resort cities: a qualitative assessment from the Gold Coast, Australia. *Ocean & Coastal Management*, 64, 1-14
- FAO. (2014). The state of world fisheries and aquaculture, opportunities and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 243 p. Recuperado el 7, noviembre, 2015, de <http://www.fao.org/3/a-i3720e.pdf>.

- Flores Verdugo, F.J., P. Casasola, G. de la Lanza-Espino, y Agraz Hernández, C. (2010). El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (Eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (pp. 165-188). Campeche: SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Fragoso, P., A. Pereira Corona; F. Bautista Zúñiga; B. Prezas Hernández; N. A. Reyes (2020). Soils in extreme conditions: the case of the catenas karst-marsh-coastline in the Mexican Caribbean. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72 (2), 202. En:<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/381-sitio/resumenes/cuarta-epoca/7202/2193-7202-7-fragoso-servon>
- Frausto, O., Arroyo Arcos, L., Vázquez Sosa, A., Colín Olivares, O., Alvarado, R., Camacho Sanabria, J., Arriaga Rodríguez, J. y L. Velázquez Haller (2018). Diagnóstico de la ciudad de Playa del Carmen. En Velázquez Torres, D. (Coord.). Diagnóstico de ciudades costeras ante huracanes para la construcción de resiliencia (pp. 91 – 124). Quintana Roo: UQROO – CONACYT.
- Gamboa-Peréz H.C. (1992). Peces continentales de Quintana Roo. En D. Navarro y E. Suárez Morales (Eds.), *Diversidad Biológica en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an Quintana Roo*, México (pp 305-360). Quintana Roo: Centro de Investigaciones de Quintana Roo.
- Gobierno de Quintana Roo (2017). Reglamento de actividades en cenotes, cavernas y grutas del Municipio de Solidaridad, Periódico oficial del gobierno de Quintana Roo. Recuperado de [https://www.qroo.gob.mx/sites/default/files/unisitio2018/10/PeriodicoOficial\\_EXTRAORDINARIO\\_2017-11-21.pdf](https://www.qroo.gob.mx/sites/default/files/unisitio2018/10/PeriodicoOficial_EXTRAORDINARIO_2017-11-21.pdf)
- Góchez, A. (2015). Ciudad con la mayor tasa de crecimiento en Latinoamérica. Recuperado el día 24, noviembre, 2016, de <http://www.razon.com.mx/spip.php?article277373>
- Guido Aldana, P., A. Ramírez Camperos, L. Godínez Orta, S. Cruz León y A. Juárez León. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 20, 41-56
- H. Ayuntamiento de Solidaridad (2016) “Plan Municipal de Desarrollo, Solidaridad 2016-2018). H. Ayuntamiento de Solidaridad. Recuperado el día 16, agosto, 2017, de <http://municipiodesolidaridad.com/wp-content/uploads/2017/03/pmd.pdf>
- Hernández Arana, H. (2007). Calentamiento global y zonas costeras: peligrosa combinación. *Ecofronteras*, 31, 10-13.
- Hirales-Cota, M., J. Espinoza-Avalos, B. Schmook, A. Ruiz-Luna, R. Ramos-Reyes. (2010). Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*, 36(2); 147-159.
- Ihl, T & Frausto, O. (2014). El cambio climático y los huracanes en la Península de Yucatán. En Frausto, O. (Coord). *Monitoreo de riesgos y desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático* (pp. 91). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- INEGI. (2015). Superficie de Quintana Roo. Recuperado el día 14, abril, 2015, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/>
- INEGI (2018). Carta Geológica 1:250000, Cozumel. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2018a). Carta edafológica 1:250000, Cozumel. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2018b). Carta de Vegetación y uso del suelo 1:250000, Cozumel. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

- IPCC. (2014). Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado el día 23, noviembre, 2018, de [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap5\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap5_FINAL.pdf)
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., and Grinsted, A. (2012). Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 80-81, 14-20.
- Kuhn, M., D. Tuladhar y R. Corner. (2011). Visualising the spatial extent of predicted coastal zone inundation due to sea level rise in south-west Western Australia. *Ocean & Coastal Management*, 54, 796-806
- León, C. (2004). Piezas de un rompecabezas: dimensión socioeconómica de las costas de México. En Rivera Arriaga, E., G.J. Villalobos, I. AzuzAdeath, y F. Rosado May (Eds.). *El Manejo Costero en México* (pp. 5-26). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. México.
- Mariño Tapia, I., Mendoza Baldwin, E., Martell Dubois, R., Félix Delgado, A., Enriquez Ortiz, C., Escalante Mancera, E., Ruiz Rentería, F., González Leija, M., Uc Sánchez, E. y R. Silva Casarín. (2012). La erosión de la playa de Cancún, origen y acciones para su mitigación. *Innovación para la vinculación, FOMIX-QUINTANA ROO*. 2, 43-50
- Martell Dubois, R., Mendoza Baldwin, E., Mariño Tapia, I, Silva Casarín, R. y E. Escalante Mancera. (2012). Impactos de corto plazo del huracán Dean sobre la morfología de la playa de Cancún, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 3(4), 89-111.
- McGranahan, G., Balk, D. and Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19 (1), 17-37.
- McLaren, N. and R. Shanbhogue. (2011). Using Internet Search Data as Economic Indicators, Bank of England, Quarterly Bulletin No. 2011 Q2, 7 p.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., and van Vuuren, D.P.P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109, 213-241.
- Programa de Desarrollo Urbano de Playa del Carmen. (2010). Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Playa del Carmen, Municipio Solidaridad 2010-2050. Recuperado el día 18, septiembre, 2018, de <http://seduvi.qroo.gob.mx/pdus/25PDU%20CENTRO%20DE%20POBLACION%20PLAYA%20DEL%20CARMEN%2020%20DIC%202010.pdf>
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, 368 – 370.
- Ruiz-Ramírez, J.D., J.I. Euán-Ávila y E. Torres-Irineo. (2014). Tendencias del nivel del mar en las costas del Caribe mexicano. *European Scientific Journal*, 10 (20), 86-96.
- Ruiz-Ramírez, J. D., López Montejo, G.D. y Cabrera Guillermo, R.J. (2018). Manglares, desarrollo turístico y cambio climático en Playa del Carmen, corazón del Caribe mexicano. *Cuadernos de Biodiversidad*, 55, 28-40.
- Schewe, J., Levermann, A. and Meinshausen, M. (2011). Climate change under a scenario near 1.5°C of global warming: monsoon intensification, ocean warming and steric sea level rise. *EarthSystem Dynamics*, 2, 25-35.
- SECTUR. (2013a). Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México 2013-2018: Cancún, Quintana Roo. Recuperado el día 13, julio, 2016, de <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2015/02/PDF-Cancun.pdf>

SECTUR. (2013b). Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México. Estudio de Competitividad Turística del destino Riviera Maya. Quintana Roo: Universidad de Quintana Roo.

SECTUR-Gobierno del Estado de Quintana Roo (2013) “Agenda de competitividad de los destinos turísticos de México: Estudio de competitividad turístico del destino Riviera Maya”, SECTUR-Gobierno del Estado de Quintana Roo 2011-2016. Universidad de Quintana Roo. Recuperado el día 16, agosto, 2017, de <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2015/02/PDF-Riviera-Maya.pdf>.

SEDETUR. (2017). Reporte anual de turismo Quintana Roo 2017. Secretaría de Turismo. Gobierno del Estado de Quintana Roo 2016-2022. 35 p. Recuperado el día 7, noviembre, 2018, de <http://caribemexicano.travel/ARCHIVOS/REPORTE%20TURISMO%202017.pdf>.

Silva Casarín, R., G.R. Martínez, I. Mariño-Tapia, G.P. Vanegas, E.M. Baldwin, and E.E. Mancera. (2012). Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *Clean Soil Air Water*, 40, 911–919.

Smith, R.B. (2006). Image classification. Lincoln, Nebraska: MicroImages, Inc.

Tso, B., and P.M. Mather. (2009). Classification methods for remotely sensed data. Florida: CRC Press Taylor and Francis Group.

Vázquez Botello, A. (coord.). (2008). Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe final INE/A1-051/2008. México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito, and A. Sallenger, (2014). Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 361-409) [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (Eds.)]. United Kingdom and USA: Cambridge University Press

Wu, L. and E. Brynjolfsson. (2015). The Future of Prediction: How Google Searches Foreshadow Housing Prices and Sales. In A. Goldfarb, S.M. Greenstein, and C.E. Tucker (Ed). *Economic Analysis of the Digital Economy* (pp. 89 – 118). Chicago: University of Chicago Press

Zárate Lomelí, D. (2004). Instrumentos para la gestión y el manejo de la zona costera de México. En Rivera Arriaga, E., G.J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (Eds.). *El Manejo Costero en México* (pp 39-50). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. México.