

Ramírez Vargas, D.L., Vega Serratos, B.E., Posada Vanegas, G., 2022. Variables que inducen opresión costera, caso de estudio: Ciudad del Carmen, Campeche, México. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 4(1): 5-22. doi 10.26359/52462.0122



Variables que inducen opresión costera, caso de estudio: Ciudad del Carmen, Campeche, México

Variables that induce coastal squeeze, case study: Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico

Debora L. Ramírez Vargas, B. Edith Vega Serratos y Gregorio Posada Vanegas*

Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX),
Universidad Autónoma de Campeche. Campus VI, Av. Héroe de Nacozari 480. C.P. 24029.
San Francisco de Campeche, Campeche, México.

* autor de correspondencia: dlramire@uacam.mx

doi 10.26359/52462.0122

Recibido 02/mayo/2022. Aceptado 14/julio/2022

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Edgar Mendoza Franco

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

El término opresión costera describe un proceso dinámico en donde el aumento del nivel medio del mar y factores concomitantes (*e.g.*, aumento de tormentas, subsidencia de la costa) desplazan los hábitats costeros hacia tierra. La presencia de estructuras duras de origen antropogénico a lo largo de las costas también puede crear márgenes artificiales estáticos entre la tierra y el mar, restringiendo los hábitats costeros a una zona estrecha. El aumento del nivel del suelo con respecto a la planicie costera, que puede ser causado por un flujo hidrosedimentario interrumpido, también puede formar barreras naturales adicionales. En particular, la costa de México es vulnerable al aumento del nivel del mar, sin embargo, otros procesos más rápidos podrían estar induciendo la opresión costera en mayor medida, como la subsidencia, fenómenos hidrometeorológicos extremos, cambios en el uso del suelo y la erosión derivada de la retención de sedimentos en las cuencas costeras superiores. El objetivo de este estudio es analizar la opresión costera a lo largo de la costa de Ciudad del Carmen, Campeche, México, mediante la identificación de sus variables determinantes sustentadas en revisión bibliográfica y análisis de bases de datos de acceso libre. Los procesos analizados corresponden a los cambios de uso de suelo, la incidencia de tormentas y la presencia de estructuras duras, entre otros factores, que han aumentado rápidamente en el área de estudio en los últimos años y han provocado la pérdida de ecosistemas costeros. En última instancia, con este trabajo se pretende generar una metodología que pueda medir cuantitativamente los efectos de la opresión costera en diferentes zonas costeras. La metodología resultante sirve como herramienta para la toma de decisiones y para la gestión sostenible de las costas.

Palabras clave: zona costera, cambio de uso de suelo, incidencia de tormentas, Golfo de México, Campeche.

Abstract

Coastal squeeze describes a dynamic process in which sea level rise and concomitant variables (*e.g.*, increased storms, coastal subsidence) shift coastal habitats to land. The presence of hard structures of anthropogenic origin along the coasts can also create static artificial margins between land and sea, restricting coastal habitats to a narrow area. Ground level rise with respect to the coastal plain, which can be caused by an interrupted hydro-sedimentary flow, can also form added natural barriers. In particular, the coast of Mexico is vulnerable to sea level rise, however, other faster processes could be inducing coastal oppression/squeeze to a greater extent, such as subsidence, extreme hydrometeorological phenomena, changes in land use and erosion derived from sediment retention in the upper coastal basins. The aim of this study is analyzed coastal oppression along the coast for Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico, by finding its determining variables based on a literature review and analysis of open access databases. The processes analyzed correspond to changes in land use, the incidence of storms and the presence of hard structures, among other factors, which have increased rapidly in the study area in recent years and have caused the loss of coastal ecosystems. Ultimately, this work aims to generate a method that can quantitatively measure the effects of coastal oppression in different coastal areas. The resulting method serves as a tool for decision-making and sustainable coastal management.

Keywords: coastal zone, land use change, incidence of storms, Gulf of Mexico, Campeche.



Introducción

Es importante mencionar que los efectos del cambio climático en los niveles del mar y en los ecosistemas costeros se reconocen a nivel mundial y se cubren ampliamente en la literatura (Huerto y Mariano, 2017; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2011; Schlepner, 2008; Ortiz Pérez y Méndez Linares, 1999), estos estudios se realizan principalmente en países del norte de Europa, donde se esperan mayores impactos del aumento del nivel del mar (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Sin duda, las costas de México y, en especial, el golfo de México son vulnerables al cambio climático y al consiguiente aumento del nivel del mar. Sin embargo, la opresión costera en esta región puede estar aún más influenciada por procesos que ocurren a un ritmo más rápido, por ejemplo, el

crecimiento urbano desordenado, la erosión resultante de la retención de sedimentos en las cuencas costeras superiores o del efecto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

La opresión costera se ha definido como un proceso en el que el incremento del nivel medio del mar (INMM) en interacción con otros factores como la infraestructura rígida, provocan la pérdida de espacio en ambas direcciones: tierra y mar, y donde los ecosistemas ya no tienen las condiciones necesarias para mantener sus funciones naturales y en consecuencia reducen los bienes y servicios que proveen a las zonas costeras (Silva, *et al.*, 2020) (tabla 1). Los ecosistemas costeros naturalmente son capaces de desplazarse tierra adentro con el objetivo de adaptarse y sobrevivir a múltiples procesos

Tabla 1. Definiciones previas del fenómeno de opresión costera (Silva *et al.*, 2020).

Definiciones previas de opresión costera		
Definición	Perspectiva/ Ecosistema	Principales Causas
Las barreras antropogénicas impiden que los humedales migren hacia tierra, y las pendientes pronunciadas que bordean los humedales limitan o detienen por completo la migración de los humedales (Brinson <i>et al.</i> , 1995).	Humedales.	Infraestructura rígida.
Relacionado con la inclinación o la opresión costera, proceso por el cual el perfil de la línea de costa no retrocede ni avanza (Soulsby <i>et al.</i> , 1999).	Perfil de línea de costa transversal.	Incremento del nivel medio del mar.
Las funciones naturales de los ecosistemas costeros se pierden o inundan progresivamente, oprimidos entre las defensas costeras y el aumento del nivel del mar (DEFRA, 2003).	Hábitats costeros.	Incremento del nivel medio del mar. Infraestructura rígida.
Es el proceso en el que el incremento del nivel del mar y otros factores, como el aumento de las tormentas, empujan los ecosistemas costeros hacia tierra (Doody, 2004 y 2013).	Hábitats costeros.	Incremento del nivel medio del mar.
Los ecosistemas costeros se reducen progresivamente en área y pierden funcionalidad cuando quedan atrapados entre el incremento del nivel del mar y defensas marítimas fijas o terreno elevado (English Nature 2003). En este caso hay una pérdida del terreno intermareal (Black and Veach 2006), y hábitats (Pontee 2011). Sin embargo, la opresión costera no se refiere a las pérdidas debidas a procesos naturales (Pontee 2013). En muchos ambientes estuarinos, inundaciones e infraestructura rígida de protección costera, limitan a los ecosistemas produciendo pérdidas en su hábitat intermareal (English Nature, 2006).	Hábitats intermareales.	Incremento del nivel medio del mar. Infraestructura rígida.
El aumento del nivel del mar junto con el blindaje de la costa crea una "opresión costera" que genera pérdida de hábitats en ambas direcciones de las playas, reduciéndolas al no tener el espacio para retirarse o hundirse (Martin, 2014).	Playas.	Incremento del nivel medio del mar. Infraestructura rígida.



(*e.g.* ecológicos, geológicos, geomorfológicos, climáticos, socioeconómicos y hasta legislativos (Silva *et al.*, 2019). Sin embargo, cuando las actividades antrópicas en la zona costera crean una barrera estática que impide el desplazamiento natural de los ecosistemas costeros hacia tierra, ocurre una opresión hasta el punto crítico de la desaparición de hábitats (Silva *et al.*, 2020; Pontee, 2013; Doody, 2004 y 2013; English, 2006; DEFRA, 2003 y 2005) (figura 1).

Uno de los efectos de la opresión costera al reducir el espacio en ambos sentidos (tierra y mar) sobre los ecosistemas ubicados en la zona intermareal es la disminución de su salud, integridad y resiliencia, propiciando su desaparición. Los humedales, las playas y las dunas se encuentran entre los ecosistemas más amenazados por la opresión costera a pesar del valor reconocido de estos ecosistemas.

La pérdida de estos ecosistemas es una preocupación apremiante, ya que proporcionan una amplia gama de bienes y servicios ecosistémicos, incluidos el secuestro de carbono, la purificación del agua, la protección costera, la regulación de inundaciones y el apoyo a la biodiversidad. En los últimos años, varios estudios han demostrado que las dunas costeras contribuyen a la prestación de servicios ecosistémicos como la protección contra inundaciones, la recreación, la prevención de la salinización y la protección del agua potable. Además, las características de los ecosistemas pueden ser utilizadas para proponer soluciones basadas en la naturaleza para abordar numerosos desafíos ambientales, sociales y económicos (Lithgow *et al.*, 2019).

Doody en el 2004, consideró que la opresión costera se debía únicamente al cambio climático y al aumento del nivel medio del mar. Sin embargo,

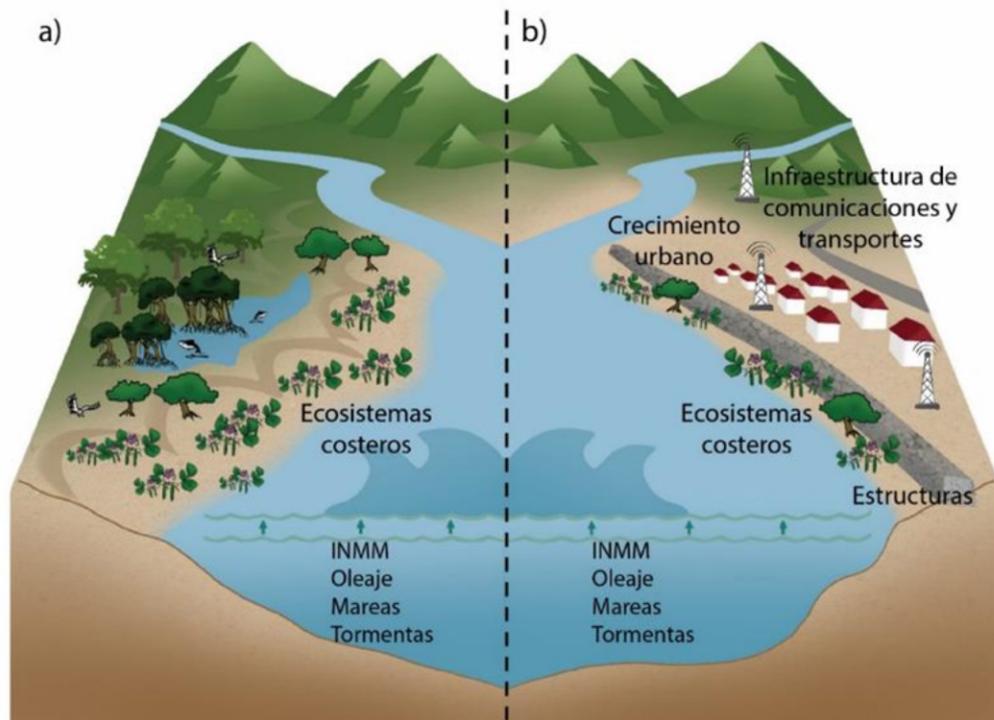


Figura 1. Esquema del proceso de opresión costera: a) Los ecosistemas costeros son capaces de desplazarse tierra adentro sin la presencia de barreras rígidas producto de las actividades antrópicas. b) Los ecosistemas no son capaces de desplazarse tierra adentro debido a la presencia de barreras rígidas producto de las actividades antrópicas. (Fuente: modificado de Fries. (2013).



en su publicación del 2013, observó que la construcción de obras de protección costera contribuía a la erosión e intensificaba los efectos de la opresión costera (Doody, 2013). En este proceso se reconoció que las modificaciones implementadas por la mano del hombre producían un estrechamiento de la zona intermareal. Posteriormente, se identifican otros elementos que generan opresión costera como los cambios en el uso del suelo o en la duración e intensidad de las tormentas (Doody, 2013; Pontee, 2013). El estudio de la opresión costera requiere abordar diferentes perspectivas para comprender las causas y consecuencias de este proceso

costero, de tal manera que el objetivo del presente trabajo es generar una herramienta que describa detalladamente el fenómeno de opresión costera y sus factores detonantes. Adicionalmente la herramienta resultante, pretende sugerir estrategias para evaluar la distribución y el impacto de este fenómeno y, por lo tanto, respaldar las acciones de gestión para enfrentarlo y mantener el balance de la zona y ecosistemas costeros. La metodología resultante es aplicada a Ciudad del Carmen en el estado de Campeche debido a la importancia económica que aquí se desarrolla y por los ecosistemas costeros que la conforman.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El estado de Campeche está ubicado en el suroeste de México (20.86° y 17.8° N, -89.1° y -92.45° W) en la península de Yucatán (figura 2). Limita

con el golfo de México y los estados de Yucatán, Quintana Roo, Tabasco, así como con los países de Belice y República de Guatemala. El estado ocupa el 2.9 % del área total de México ($57\,500\text{ km}^2$) y

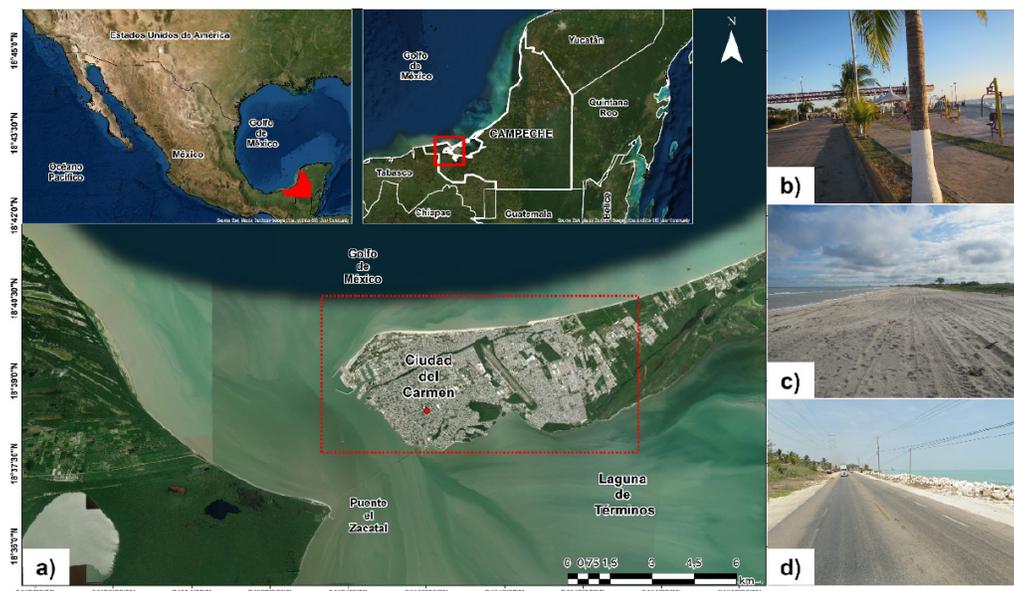


Figura 2. Ciudad del Carmen: a) Localización de la zona de estudio; b) Malecón, c) Ancho de playa y, d) Infraestructura (líneas de luz eléctrica). Fuente de la imagen satelital: Esri, Maxar, Earthstar Geographics and the GIS User Community. Disponible en <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08feb2a9>, Fotografías y mosaico de generación propia.



tiene 928 363 habitantes (INEGI, 2020). Su clima cálido y más de 520 km de costa han hecho de este estado un destino turístico popular (Posada *et al.*, 2013). Debido a las características geomorfológicas de la zona, los suelos tienen orígenes marinos y sedimentarios y están compuestos principalmente de carbonato de calcio. La plataforma continental es amplia, se extiende de 33 a 55 km hacia el mar, con profundidades de 70 a 220 m (Nava-Fuentes *et al.*, 2018). Los sedimentos de la playa tienen composiciones calcáreas y margosas con tamaños que van del limo a la grava (Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, 2010).

Ciudad del Carmen es la segunda ciudad más grande del estado de Campeche con un total de 191 238 habitantes (INEGI, 2020). Se encuentra delimitada por el golfo de México y la laguna de Términos (18°38'18''N, 91°50'07''O). La principal actividad económica es la relacionada con la industria del petróleo, en orden de aporte económico le sigue el turismo y la pesca. Dadas sus características naturales, la mayor parte de la superficie de la ciudad sufre inundaciones periódicas, en particular en su porción colindante con la Laguna de Términos y los diversos cuerpos de agua que existen (Padilla y García, 2015).

Por su localización geográfica y condiciones favorables a la navegación, desde finales de los años setentas del siglo pasado, Ciudad del Carmen y el puerto ubicado en ella fueron seleccionados para fungir como la principal base de apoyo logístico a las actividades de exploración, perforación, desarrollo de infraestructura marina y producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos en la región

de la sonda de Campeche y dentro de ella principalmente de la Región Marina Suroeste de México (API Puerto Isla del Carmen) (Padilla *et al.*, 2015b).

Una de las características principales de Ciudad del Carmen es su hidrodinámica compleja regida por la aportación de agua continental mediante ríos, la dinámica de mareas y por procesos de evaporación-precipitación. El rango entre la pleamar y la bajamar medias en Ciudad del Carmen es de 0.43 m, y el promedio de la pleamar máxima es de 0.40 y -0.70 m (Kuc *et al.*, 2015).

Identificación de variables que inducen opresión costera

Se identificaron variables que inducen opresión costera con base en la revisión de artículos científicos que han evaluado el proceso de opresión en el área de estudio. Los factores que causan opresión costera se confirmaron en imágenes satelitales de *Google Earth*. Primero, todos los factores se dividieron en naturales o antropogénicos, luego, los factores se dividieron en aquellos relacionados con la tierra o el agua. Según la literatura, las variables naturales más importantes que afectan la opresión costera son el aumento del nivel medio del mar, el oleaje, las marea de tormenta, las tormentas y la erosión. Las variables antropogénicas más importantes son los cambios en el uso del suelo, la densidad de población y el desarrollo de infraestructura. La tabla 2 presenta las variables que son determinantes clave de la opresión costera en el área de estudio. La metodología para evaluar estas variables en el área de estudio se describe con mayor detalle a continuación.

Tabla 2. Variables que inducen opresión costera.

Variables Naturales		Variables antrópicas			
Variable	Unidad	Variable	Unidad		
Mar	Incremento del Nivel Medio del Mar	metros (m)	Estructuras de protección costera	metros cuadrados (m ²)	
	Marea de Tormenta	metros (m)	Tierra	Cambio de uso de suelo	metros cuadrados (m ²)
	Oleaje	metros (m)		Densidad de población	habitantes/metros cuadrados
	Tormentas	eventos por año	Desarrollo de infraestructura	metros cuadrados (m ²)	
	Evolución de la línea de costa	metros (m)			



Para determinar las variables que inducen opresión costera fueron determinantes las características geomorfológicas de la zona costera en estudio y de la cantidad de información disponible para su evaluación dentro de bases de datos de uso libre (por ejemplo: el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) (CONABIO, 2017); los tabulados de población que ofrece el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), en el apartado de Densidad de población por entidad federativa (INEGI, 2020); Manifestaciones de Impacto Ambiental dentro de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2022) El método para cuantificar la opresión costera debe reflejar el grado de los efectos ecológicos y socioeconómicos resultantes en el área de estudio, por lo tanto, la determinación de las variables que detonan el proceso es de suma importancia para proponer una adecuada metodología y cuantificación del proceso.

A continuación, se describen las variables determinadas para influir en la opresión costera en el área de estudio. Estas variables se consideraron a partir de la revisión bibliográfica realizada y que reflejan las variables que inducen la opresión costera (tabla 1). La identificación de estas variables es uno de los pasos más importantes en este proceso, ya que todas las zonas costeras son únicas en su dinámica hidrosedimentaria y procesos físicos.

Las variables naturales más determinantes de la opresión costera son las siguientes:

- **Incremento del nivel medio del mar:** De acuerdo con la revisión bibliográfica, se consideran varios escenarios para el aumento del nivel del mar (8 cm para 2030, 13.5 cm para 2050 y 33 cm para 2100) (Fox-Kemper *et al.*, 2021).
- **Oleaje:** Se consideran las condiciones normales de oleaje versus las de marejadas ciclónicas para determinar su relación con otras variables. Los datos obtenidos de Ruiz, *et al.* (2009); indicaron que las olas tienen una altura de 0.65 a 1.0 m y se acercan a la costa cada 7 a 10 segundos.
- **Frecuencia e intensidad de las tormentas:** Una búsqueda bibliográfica identificó todos los eventos hidrometeorológicos extremos registrados en el área y sus efectos socioeconómicos asociados (NOAA, 2011). El compilado de información fue organizado en tablas y gráficas que detallan sus características principales como su tipo e intensidad.
- **Evolución de la línea de costa:** Para conocer la evolución de la línea de costa, dependiendo de la calidad y disponibilidad de uso libre de la imagen satelital dentro del programa *Google Earth*, se realizaron análisis comprendidos entre el periodo de 2005 a 2015. Las imágenes satelitales se obtuvieron de la aplicación *Google Earth Pro*, con la ayuda de su herramienta de Imágenes históricas, posteriormente se procedió a la digitalización de cada una de las imágenes en el software *ArcMap* 10.8. Finalmente se aplicó la metodología Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versión 5 (Himmelstoss *et al.*, 2021). DSAS estima estadísticas de tasas de cambio para vectores de tiempo en líneas de costa. Dichos vectores son líneas perpendiculares, trazadas de forma equidistante entre sí, a criterio del usuario, dependiendo de la escala de trabajo a partir de una línea base. Las perpendiculares deben cruzar a las líneas de costa que se desea describir y son generadas por el programa DSAS (Thieler *et al.*, 2017).
- **Marea de tormenta:** La zona de estudio al considerarse zonas de baja elevación se encuentra expuesta ante el fenómeno de marea de tormenta ya que con un aumento de pocos decímetros pueden inundarse grandes extensiones de terreno, además al combinarse con marea alta y una gran precipitación el área inundable debido al desbordamiento de los ríos o arroyos se magnificará (Posada *et al.*, 2013). Por lo que se tomó la caracterización de Isla del Carmen para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años publicado en el Atlas de Peligros Naturales para el estado de Campeche.



Las variables antrópicas más determinantes de la opresión costera son las siguientes:

- **Cambio de uso de suelo:** Tomando la serie de datos publicada por el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI) (2021) en el Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional), que contiene información del Uso del Suelo y Vegetación obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes geomedianas de la constelación satelital Landsat seleccionadas con año base 2018; procesadas en Cubo de Datos Geográficos. Esta interpretación está apoyada con trabajos de campo. Son conjuntos de datos que contienen la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes en tipos de vegetación, cultivos, e información ecológica relevante. Dicha información geográfica digital contiene datos estructurados en forma vectorial codificados de acuerdo con el Diccionario de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie IV para la Escala 1:250 000 aplicables a las diferentes unidades ecológicas (comunidades vegetales y usos antrópicos) contenidos en el conjunto de datos (INEGI, 2021). Para generar un mapa de representación de uso de suelo de Ciudad del Carmen, se realizó una identificación de los usos de suelo más predominantes como el tipo de selva, agricultura, asentamientos humanos, sin vegetación y manglares.
- **Densidad de población:** Dentro de los tabulados de población que ofrece el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), en el apartado de Densidad de Población por entidad federativa, serie de años censales de 1990 a 2020 (https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?px=Poblacion_07&bd=Poblacion) se consultó la densidad de población para nuestro caso de estudio (INEGI, 2020). En una siguiente actualización de estudio, se pretende cuantificar la tasa de crecimiento de la población en la región costera.
- **Desarrollo de infraestructura:** Se analizaron las Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) que detallan las obras a realizar en la zona costera (SEMARNAT, 2022). Después de identificar las obras, se elaboró una base de datos para identificar los impactos potenciales, según se enumeran en las MIA, además de las modificaciones de los sitios costeros, la inversión requerida y los objetivos de las obras.
- Las variables asociadas con las tormentas y la evolución de la línea de costa se consideraron como las principales variables que inducirían la opresión costera en el área de estudio. El cambio climático y el aumento asociado del nivel medio del mar son otros factores importantes que afectan a las costas de todo el mundo. Sin embargo, en la zona de estudio, los factores que más impactaron la pérdida de ecosistemas parecían estar operando a corto plazo, como las tormentas y el desarrollo de infraestructura a lo largo de la costa (Ramírez *et al.*, 2019).

Resultados y discusión

De acuerdo con las variables identificadas y sus impactos en el área de estudio, se destacaron las formas en que estas diferentes variables podrían usarse para cuantificar la opresión costera como parte de los primeros pasos en la formulación de una metodología cuantitativa.

Las variables identificadas incluyeron procesos naturales como el transporte de sedimentos y la dirección del transporte de sedimentos, así como la distribución de la vegetación local. Sin embargo, las variables antropogénicas fueron las más representativas, incluyendo el desarrollo de nuevos asen-



tamientos, caminos e infraestructura, es decir los cambios que las variables naturales generan fueron aprovechados por las variables antrópicas para generar desarrollo de infraestructura y el crecimiento poblacional y así desencadenar el fenómeno de opresión costera en la zona de estudio. (figura 3).

Los resultados indicaron que los eventos de tormentas por año, que es un factor natural, es la variable con mayor influencia en la opresión costera. Mientras tanto, el cambio de uso del suelo es la

variable antropogénica más impactante. A continuación, se enumeran las variables identificadas y los datos a incluir en el modelo cuantitativo que se pretende generar en la siguiente actualización del fenómeno de opresión costera.

Las variables naturales más determinantes de la opresión costera son las siguientes:

- **Incremento del nivel del mar:** 8 cm para 2030, 13.5 cm para 2050 y 33 cm para 2100 (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

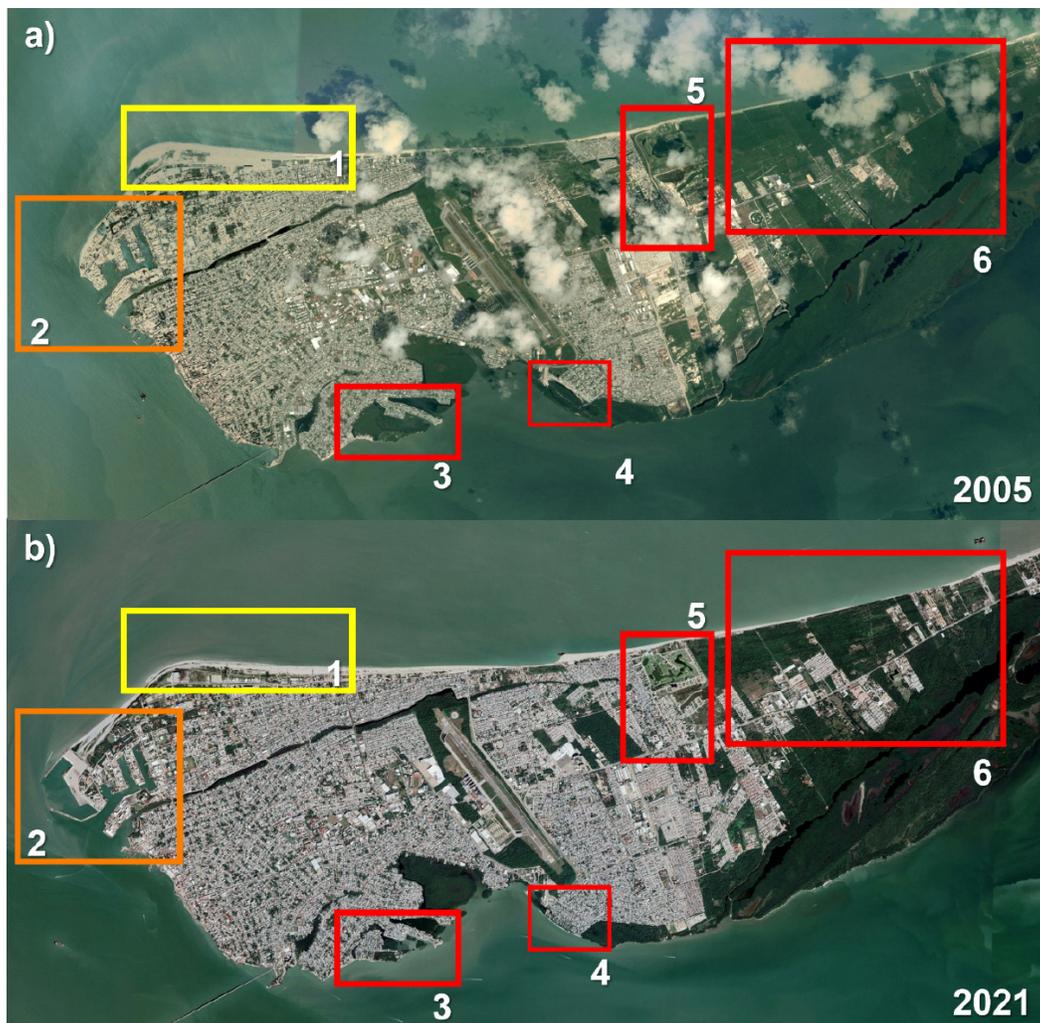


Figura 3. Cambios naturales y antrópicos en Ciudad del Carmen, Campeche que inducen opresión costera comparando a) año 2005 versus b) año 2021: 1. El transporte sedimentario modificado (dirección); 2. Desarrollo de infraestructura como el puerto pesquero de la ciudad; 3, 4 y 6. Desarrollo de asentamientos humanos sobre vegetación de selva o humedal, la mayoría de las veces sin un plan de ordenamiento territorial; 5. Terrenos destinados para recreación como restaurantes, campos de golf o playas de acceso privado.



- **Oleaje:** Altura de las olas entre 0.65 a 1.0 m y periodo de 7 a 10 segundos.
- **Frecuencia e intensidad de las tormentas:** Desde 1961, se producía una tormenta extraordinaria en la zona cada 7 años. Sin embargo, desde el paso del huracán Isidoro en 2002, ninguna tormenta adicional ha afectado la zona. Esto puede deberse a los fenómenos de El Niño y La Niña (figura 4).
- **Evolución de la línea de costa:** Los resultados sugieren que la mayor parte del área de estudio tiene playas estables con tasas que oscilan entre 20 y 40 m/año. Sin embargo, algunas playas mostraron evidencia de interrupción de la dinámica hidrosedimentaria (tabla 3).

De manera general, algunos de los desplazamientos hacia tierra (denotados como evolución) se deben a los efectos de la temporada estacional conocida como “nortes” que va de noviembre a febrero, por lo que el desplazamiento de la línea de

costa es cíclico y responde a las diferentes temporadas meteorológicas que ocurren en el estado de Campeche.

- Ciudad del Carmen presenta un retroceso de línea de costa de más de 100 m mientras que tiene un avance hacia mar de 80 m lo cual se puede observar en la figura 5 en el transecto 32.
- **Marea de tormenta:** En la figura 6 se presenta la caracterización de marea de tormenta para la parte norte de la Isla del Carmen en función del periodo de retorno, esta fue obtenida al simular numéricamente los huracanes que han pasado, al menos a 200 km de distancia del estado de Campeche, (Posada *et al.*, 2013).

Las variables antrópicas más determinantes de la opresión costera son las siguientes:

- **Cambio de uso de suelo:** Para la zona de Ciudad del Carmen se identificaron los usos de suelo del tipo selva, agricultura, asentamientos

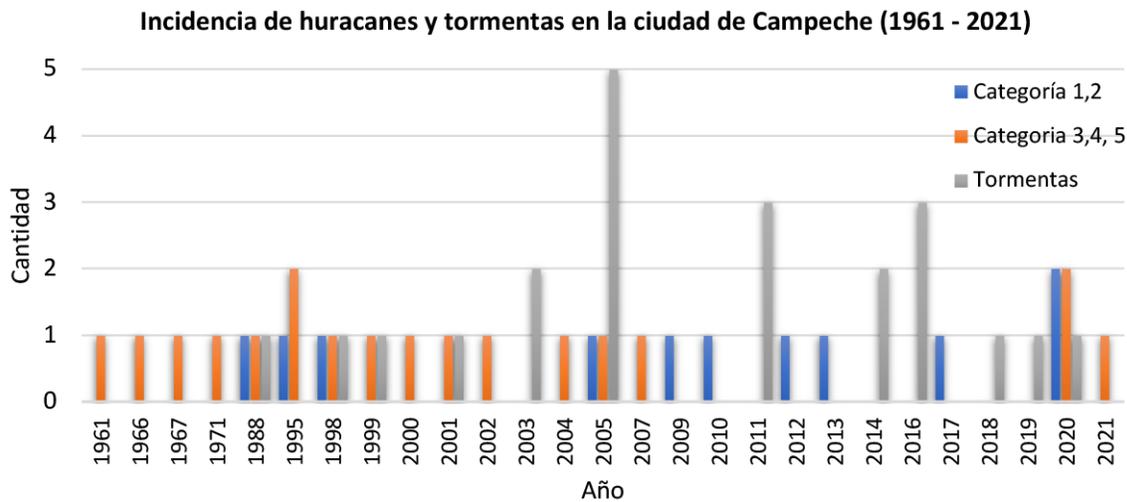


Figura 3. Incidencia de eventos extremos para la costa de Campeche.

Tabla 3. Evolución de la línea de costa de Ciudad del Carmen, Campeche, México..

Zona de Estudio	Evolución (-)	Evolución (+)	Tasa de evolución (m/año)
Ciudad del Carmen	-105.82	83.78	26.12

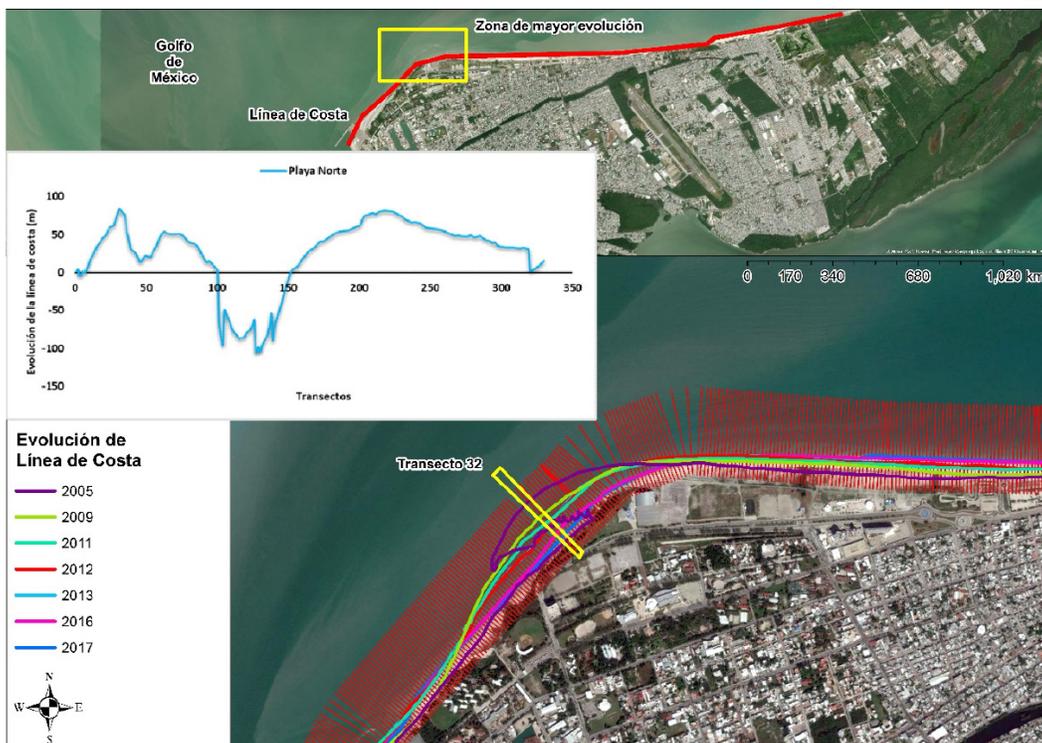


Figura 5. Evolución de la línea de costa en el período del 2005 al 2015 para Ciudad del Carmen, Campeche.

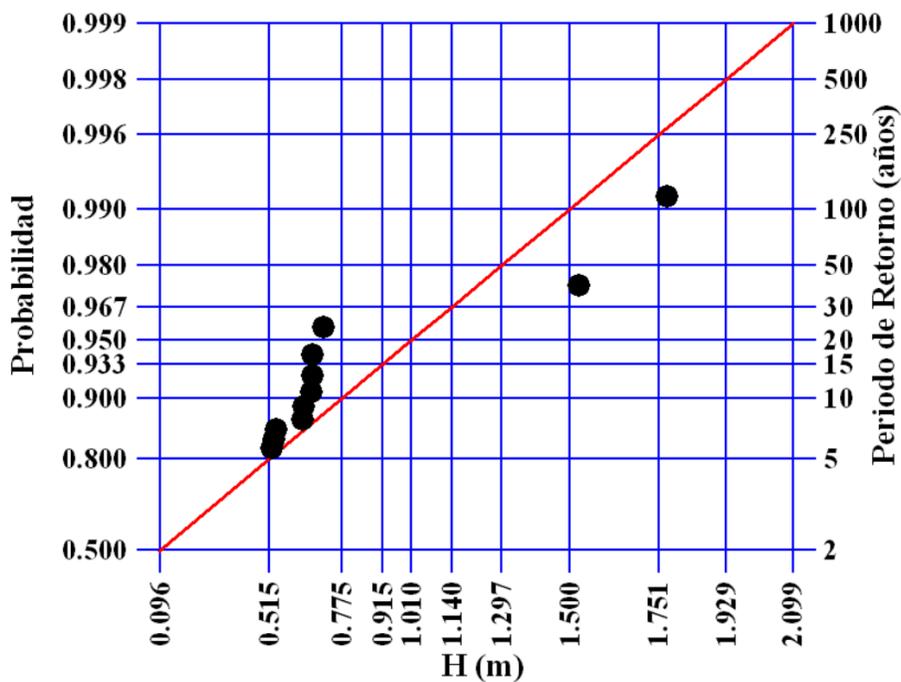


Figura 6. Caracterización de marea de tormenta para la parte norte de la isla del Carmen en función del periodo de retorno, Posada et al 2013.



humanos, sin vegetación y manglares (figura 7).

Los resultados indican un crecimiento para las zonas de asentamientos humanos (1997 con 140 ha al 2013 con 170 ha) y manglares (1997 con 56 ha hasta el 2013 con 88 ha) entre las 25 y 32 hectáreas. Este crecimiento se ve reflejado en la pérdida de hectáreas para la vegetación (1997 con 150 ha al

2013 con 121 ha) y para la agricultura (1997 con 107 ha al 2013 con 79 ha) en el periodo de 1997 al 2013 con aproximadamente 29 y 28 ha respectivamente (tabla 4) (figura 8). Lo anterior se ve reflejado en el crecimiento poblacional y por consiguiente la urbanización de la zona donde la agricultura y la selva han sido modificados por dicha acción.

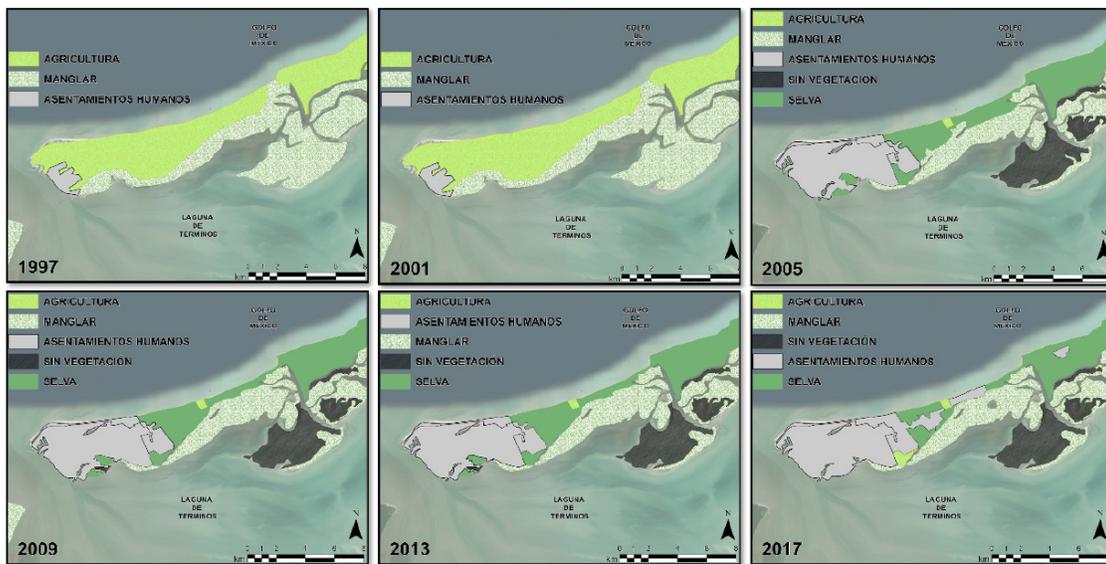


Figura 7. Descripción de los cambios de uso de suelo para Ciudad del Carmen para los años 1997, 2001, 2005, 2009, 2013 y 2017. Fuente: CONABIO (2017), elaboración propia..

Tabla 4. Cambio de uso de suelo en hectáreas y porcentaje para Ciudad del Carmen en el periodo de 1997 al 2017..

Año	Manglar	Agricultura	Asentamientos humanos	Selva	Sin vegetación	Total (Ha)	Manglar	Agricultura	Asentamientos humanos	Selva	Sin vegetación
1997	607.18	2172.686	270.59	0	0	3050.5	20 %	71 %	9 %	0 %	0 %
2001	252.95	0	1989.43	780.87	0	3023.2	8 %	0 %	66 %	26 %	0 %
2005	252.94	0	2368.364	401.97	0	3023.3	8 %	0 %	78 %	13 %	0 %
2009	252.94	0	2377.924	376.05	16.357	3023.3	8 %	0 %	79 %	12 %	1 %
2013	254.33	0	2377.452	373.69	16.357	3021.8	8 %	0 %	79 %	12 %	1 %
2016	225.16	84.407	2600.077	92.256	0	3001.9	8 %	3 %	87 %	3 %	0 %



CAMBIO DE USO DE SUELO DE CIUDAD DEL CARMEN (1997-2017)

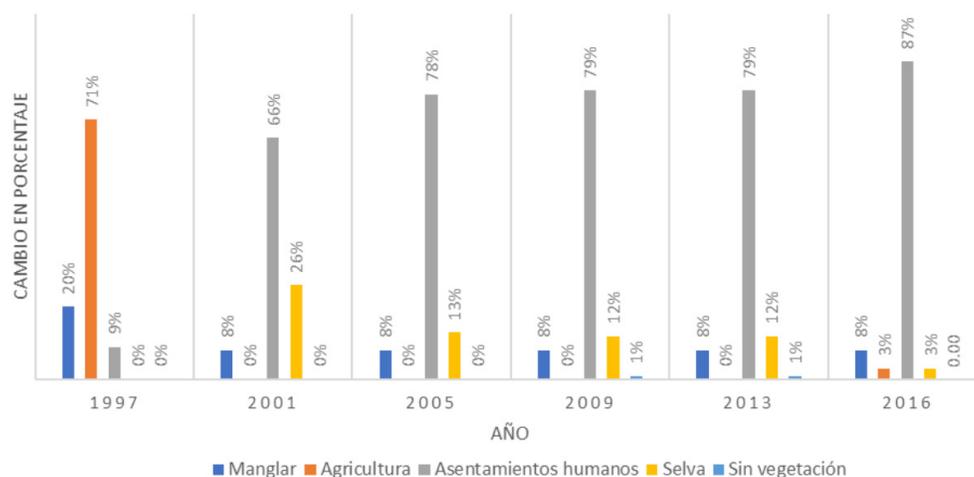


Figura 8. Representación gráfica del cambio de uso de suelo para Ciudad del Carmen en el período de 1997 al 2017.

- **Densidad de población:** La densidad de población para el estado de Campeche es de 16 hab/km² (INEGI, 2020).
- **Desarrollo de infraestructura:** Se identificaron 127 estructuras que impactan el medio ambiente, aunque es probable que la mayoría tengan un alto impacto e induzcan la opresión costera, incluidas las áreas de recreación (tabla 5).

La mayor amenaza que enfrenta el litoral es la opresión costera (Scheleuper, 2008; Defeo et al., 2009; Silva, et al., 2020). Las playas están sujetas al

aumento del nivel del mar, la erosión y el aumento de los desarrollos costeros. La reducción de las playas limita la migración de los ecosistemas costeros tierra adentro (Galbraith et al., 2010; Dugan et al., 2010), lo que contribuye a la degradación de los ecosistemas costeros y a la disminución de la provisión de servicios ecosistémicos, como la protección contra tormentas. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere utilizar métodos de lógica clásica (Ramírez et al., 2019), multicriterio (Lithgow et al., 2010) y sistemas de información geográfico (Himmelstoss et

Tabla 5. Descripción de infraestructura identificada en Ciudad del Carmen, Campeche, México.

Zona de estudio	Casas	Estructuras	Habitantes	Áreas de recreación (m ²)
Ciudad del Carmen	225	1 campo de beisbol	191 238	278 300
		1 puerto de embarcación		
		1 malecón		
		1 local para motos acuáticas		
		1 explanada social		
		40 palapas		
		82 estructuras comerciales		
		1 club deportivo		
		Total = 128		



al., 2021), para cuantificar el efecto que la opresión costera ejerce en la zona de estudio. Estas metodologías se pueden utilizar para determinar la magnitud de la opresión costera en un área determinada y proponer alternativas que preservarían tanto los ecosistemas costeros y las actividades económicas clave. Los beneficios concretos de la aplicación de metodologías diversas radican en su capacidad de aplicación en numerosas zonas costeras y en la implementación de un modelo matemático que posibilite desarrollar una predicción (Ramírez *et al.*, 2018).

Si los niveles del mar aumentan en ausencia de estructuras costeras, la zona intermareal puede moverse tierra adentro sin pérdida o reducciones perjudiciales de los hábitats en esta zona. Sin embargo, cuando existen obras de defensa costera, el movimiento hacia tierra de los ecosistemas es limitado. Por lo tanto, en combinación con el aumento del nivel del mar, los hábitats costeros se verían comprometidos. Un proceso continuo de opresión costera podría conducir potencialmente a la desaparición de los ecosistemas costeros (Black, 2006).

Los principales ecosistemas amenazados por la opresión costera son las dunas y los humedales. La desaparición de estos ecosistemas sería preocupante ya que brindan una amplia variedad de bienes y servicios ecosistémicos como la protección contra huracanes y espacios de reproducción y anidación de diferentes especies. Además de la opresión costera, los ecosistemas del litoral se degradan por numerosas causas naturales y antropogénicas, por ejemplo, la erosión, salinización, sequía, extracción de aguas subterráneas, contaminación por escorrentías agrícolas y urbanas, construcción de fronteras y represas (Torio, 2013).

Las playas y dunas costeras son ecosistemas dinámicos capaces de responder a diferentes factores, en donde las perturbaciones naturales forman parte de la dinámica de estos ecosistemas (Lithgow *et al.*, 2013; Bimal *et al.*, 2016). La capacidad de los ecosistemas costeros para resistir agentes externos de perturbación sin perder sus funciones actuales o potenciales (resistencia) dependerá de numero-

sos factores morfológicos, ecológicos y socioeconómicos (Reggiani *et al.*, 2015). Sin embargo, la presencia de infraestructura en la costa modifica la geomorfología y el funcionamiento costero y, por lo tanto, limita la capacidad de los ecosistemas asociados para responder a las perturbaciones (Pontee, 2013; Martínez *et al.*, 2014;).

La costa examinada de Ciudad del Carmen se encuentra en peligro por el desarrollo de infraestructura, cambios de uso de suelo y construcción de estructuras de protección, que provocan erosión y cambios en la dinámica de transporte de sedimentos. Las actividades futuras en el área de estudio determinarán si los ecosistemas locales se pierden o se conservan. Generar un protocolo para cuantificar la opresión costera es de suma importancia y representa un reto metodológico que implementaría herramientas útiles para los tomadores de decisiones y serviría para identificar las principales variables que influyen en la opresión costera en un sitio en particular. Los primeros pasos hacia la formación de una metodología cuantitativa se destacan en el presente estudio.

La identificación de las variables que inducen opresión costera es quizás uno de los pasos más importantes en la determinación y caracterización de este proceso ya que todas las zonas costeras son únicas en su dinámica hidrosedimentaria y procesos físicos que en ellas se desarrollan.

Dentro de las revisiones bibliográficas realizadas, se considera necesario la integración de otras variables como el fenómeno de la subducción que integra un análisis de las placas tectónicas y la dinámica costera. Otra variable identificada es la pesca, sin embargo, los temas que la conforman necesitan de mayor esfuerzo computacional y social por parte de los actores involucrados en este tema, por ello se sugiere la continuidad de este proyecto, ya que una mejor caracterización y descripción de las variables que inducen el fenómeno de opresión costera generará mejores soluciones y/o medias para el aprovechamiento ingenieril, ecológico, económico y social de las zonas costeras.



Conclusiones

El presente estudio identificó los elementos naturales y antropogénicos con el potencial de inducir opresión costera en el litoral de Ciudad del Carmen. La identificación de estas variables es un aspecto importante para implementar un modelo numérico eficiente para cuantificar los efectos de estas variables en la opresión costera. Este modelo permitiría a los planificadores y tomadores de decisiones a identificar áreas prioritarias para la conservación o amortiguamiento y también determinar

las variables más importantes que atender con el fin de reducir la presión costera en un sitio en particular.

Este estudio sugiere que el litoral examinado está atravesando un proceso de opresión costera como respuesta al incremento de infraestructura urbana. El desplazamiento estimado en la línea de costa atribuido a la opresión costera oscila entre los 190 metros de erosión y los 80 metros de acreción.

Agradecimientos

La primera autora agradece al CONACYT por la aprobación de la estancia Posdoctoral en la convocatoria “Estancias Posdoctorales Por México

Modalidad 1, Académica”. 2021-2022, la cual se desarrolla en el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche.

Referencias

- Bimal, P., Harum, R., 2016. Climatic hazards in coastal Bangladesh: non-structural and structural solutions. *Butterworth-Heinemann*. ISBN 978-0-12-805276-1, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00129-0>
- Black and Veatch, 2006. Coastal squeeze study, Issue 2. Report produced for the Environment Agency, 30pp + appendices.
- Brinson, M.M.; Christian, R.R.; Blum, L.K., 1995. Multiple States in the Sea-Level Induced Transition from Terrestrial Forest to Estuary. *Estuaries*, 1995, 18, 648–659, <https://doi.org/10.2307/1352383>
- CONABIO, 2017. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Registros de ejemplares, versión 2017-12 México. Disponible en: <https://www.snib.mx/ejemplares/docs/CONABIO-SNIB-Version-201712.pdf>
- CONABIO, 2022. Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Defeo, O.; McLachlan, A.; Schoeman, D.S.; Schlacher, T.A.; Dugan, J.; Jones, A.; Lastra, M.; Scapini, F., 2009. Threats to sandy beach ecosystems: A review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2009, 81, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>
- DEFRA, 2003- Guidance Note on Managed Realignment: Land Purchase, Compensation and Payment for Alternative Beneficial Land Use; DEFRA: London, UK, 2003.
- DEFRA, 2005. Coastal Squeeze Implications for Flood Management the Guidance. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181444/coastalsqueeze.pdf
- Doody, J. P., 2004. ‘Coastal squeeze’—an historical perspective. *Journal of Coastal Conservation*, 10(1), 129-138, [https://doi.org/10.1652/1400-0350\(2004\)010\[0129:C-SAHP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1652/1400-0350(2004)010[0129:C-SAHP]2.0.CO;2)
- Doody, J. P., 2013., Coastal squeeze and managed realignment in southeast England, does it tell us anything about the future?, *Ocean & Coastal Management*, 79, 34-41, ISSN 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.05.008>
- Dugan, J.E., Defeo, O., Jaramillo, E., Jones, A.R., Lastra, M., Nel, R., Peterson, C.H., Scapini, F., Schlacher, T., Schoeman, D.S., 2010. Give Beach Ecosystems Their Day in the Sun, *Science*, Vol 329, Issue 5996, Page 1146, <https://doi.org/10.1126/science.329.5996.1146-a>



- English Nature, 2003. Conservation of Dynamic Coasts: A Framework for Managing Natura 2000. Living with the Sea LIFE Project; 1857167430; English Nature: Peterborough, UK, 2003. <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/details/314#>
- English Nature, 2006. Coastal Squeeze, Saltmarsh Loss and Special Protection Areas; English Nature Research Report No. 710; Royal Haskoning for English Nature: Peterborough, UK, 2006; p. 55. <http://publications.naturalengland.org.uk/publication/62014?category=47017>
- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E.Kopp, G.Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu., 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011., https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter09.pdf
- Fries, A., 2013. Integration and Application Network, University of Maryland Center for Environmental Science, <https://ian.umces.edu/media-library/coastal-wetlands-resilience-to-climate-change-comparison/>
- Galbraith, H., Jones, R., Park, R., Clough, J., Herrod-Julius, S., Harrington, B., & Page, G., 2002. Global Climate Change and Sea Level Rise: Potential Losses of Intertidal Habitat for Shorebirds. *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology*, 25(2), 173–183. <http://www.jstor.org/stable/1522092>
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A.S., 2021. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091, Pag 104 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Huerto Delgado, R., & Mariano Romero, C., 2017. Estudio del nivel del mar, erosión y subsidencia en la planicie costera sur del Golfo de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Proyecto HC1708.1, <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2006>
- INEGI, 2020. Censo de Población y Vivienda (2020). Panorama sociodemográfico de Campeche: Censo de Población y Vivienda 2020: CPV / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. -- México: INEGI, c2021. 43 p. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197759.pdf
- INEGI, 2021, Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000, <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
- Kuc, A.G, Posada, G., Vega, B.E., 2015, Evaluación Hidrodinámica en la Laguna de Términos, p 145-166. En: Ramos Miranda J., y G.J. Villalobos Zapata (editores). Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210 p. ISBN 978-607-8444-12-0. <https://epomex.uacam.mx/view/download?file=14/Aspectos%20Socioambientales%20de%20la%20Regio%CC%81n%20de%20la%20Laguna%20de%20Te%CC%81rminos%20.pdf&tipo=paginas>
- Lithgow, D., Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., Silva, R., & Ramírez-Vargas, D. L., 2019. Exploring the co-occurrence between coastal squeeze and coastal tourism in a changing climate and its consequences, *Tourism Management*, 74, 43-54, ISSN 0261-5177, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261517719300342>
- Lithgow, D., Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., Hesp, P.A., Flores, P, Gachuz, S., Rodríguez-Revelo, N., Jiménez-Orocio, O., Mendoza-González, G., Álvarez-Molina, L.L., 2013. Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology*, Vol 199, Pag 214-224, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.007>
- Martin, K.L., 2014. Coastal squeeze: New threats to beach-spawning fishes and their critical habitats. In *Beach-Spawning Fishes: Reproduction in an Endangered Ecosystem*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014; pp. 157–174. ISBN 9780429188541, <https://doi.org/10.1201/b17410>
- Martínez, M.L.; Mendoza-González, G., Silva, R.; Mendoza, E., 2014. Land use changes and sea level rise may induce a “coastal squeeze” on the coasts of Veracruz, Mexico. *Glob. Environ. Chang.* 29, 180–188, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.09.009>
- Nava-Fuentes, C.J., Arenas-Granados, P., and Cardoso-Martins, F., 2018. Integrated coastal management in Campeche, Mexico; a review after the Mexican marine and coastal national policy, *Ocean & Coastal Management*, 154, 34–45, ISSN 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.12.029>
- NOAA, 2011. National Hurricane Center, Monthly Weather Review - Annual Summaries of North Atlantic Storms, 1872-2011. <https://www.aoml.noaa.gov/general/lib/lib1/nhclib/mwreviews.html>
- Ortiz Pérez, M.A, & Méndez Linares, A P., 1999. Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas, Boletín* 39, 68-81. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n39/n39a5.pdf>
- Padilla y Sotelo, L.S., Martínez, A., Kumar, A., 2015. Dinámica Territorial de Isla del Carmen, Campeche, A Partir de imágenes Landsat 1984-2000. *Acta Geográfica*, 9(20), 109-125, ISSN 1980-5772, eISSN 2177-4307, <https://revista.ufr.br/actageo/article/view/2315/1762>
- Padilla y Sotelo, S., y García de León Loza, A., 2015. Isla, ciudad y puerto del Carmen: ¿Caso de desarrollo o ejemplo de dependencia económica? en: Pasado, presente y futuro de las regiones en México y su estudio. Asocia-



- ción Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C., México. ISBN AMECIDER: 978-607-96649-1-6 UNAM-IIEc: 978-607-02-7436-7, <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/2925>
- Pontee, N., 2011. Reappraising coastal squeeze: A case study from north-west England. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering; Thomas Telford Ltd.: London, UK; Volume 164, pp. 127–138, <https://doi.org/10.1680/maen.2011.164.3.127>
- Pontee, N., 2013. Defining coastal squeeze: A discussion, *Ocean & Coastal Management*, 84, 204–207, ISSN 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.07.010>
- Posada, G., Vega, B.E, Silva, R. eds., 2013. Peligros Naturales en el Estado de Campeche: Cuantificación y Protección Civil. Secretaría de Gobernación, Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche. 202 p., ISBN 978-607-7887-53-9. <http://www.seprocam.gob.mx/descargas/Peligros%20Naturales%20en%20el%20Estado%20de%20Campeche.pdf>
- Ramírez-Vargas, D. L., Mendoza, E., Lithgow, D., Silva, R., 2018. Comparación de Variables que Inducen Opresión Costera con Respecto a su Intensidad y Duración, Caso de Estudio: Playa Norte, Campeche, México. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, septiembre, ISBN 978-897-45194-7-4.
- Ramírez-Vargas, D. L., Mendoza, E., Lithgow, D., Silva, R., 2019. A Quantitative Methodology for Evaluating Coastal Squeeze Based on a Fuzzy Logic Approach: Case Study of Campeche, Mexico., *Journal of Coastal Research*, 92(sp1), 101-111, <https://doi.org/10.2112/SI92-012.1>
- Reggiani, A., Nijkamp, P., Lanzi, D., 2015. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 4-15, ISSN 0965-8564, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.012>
- Ruiz, G., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., Pérez, D., Rivas, G., Escalante, E., Ruíz, F., 2009. Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano, *Revista de Ingeniería del Agua*, España, 2008. 16(1). ISSN 1886-4996, <https://doi.org/10.4995/ia.2009.2944>
- Schleupner, C., 2008. Evaluation of coastal squeeze and its consequences for the Caribbean Island Martinique. *Ocean & Coastal Management*, Vol 51, Issue 5, Pag 383-390. ISSN 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2008.01.008>
- SEMARNAT, 2022. en el apartado de Consulta de Trámites, <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/consultatramite/inicio.php>
- Silva, R.; Chávez, V.; Bouma, T.J.; Van Tussenbroek, B.I.; Arkenema, K.K.; Martínez, M.L.; Oumeraci, H.; Heymans, J.J.; Osorio, A.F.; Mendoza, E.; Mancuso, M., Asmus, M., Pereira, P., 2019. The incorporation of biophysical and social components in coastal management. *Estuaries Coasts*, 42, 1695–1708, <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00559-5>
- Silva, R.; Martínez, M.L., van Tussenbroek, B.I., Guzmán-Rodríguez, L.O., Mendoza, E., López-Portillo, J., 2020. A Framework to Manage Coastal Squeeze. *Sustainability*, 12, 10610. <https://doi.org/10.3390/su122410610>
- Soulsby, R.L.; Sutherland, J.; Brampton, A.H., 1999. Coastal Steepening—The UK View; Report TR 91; HRWallingfordLtd.: Wallingford, UK, <http://eprints.hrwallingford.com/id/eprint/437>
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A., 2017. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0- An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Torio, D.D., Chmura, G.L., 2013. Assessing Coastal Squeeze of Tidal Wetlands. *Journal of Coastal Research*, 29(5), 1049-1061.8, <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00162.1>
- Villalobos-Zapata, G.J. y Mendoza Vega, J (Coords), 2010. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. ISBN 978-607-7887-21-8, <https://epomex.uacam.mx/view/download?file=14/La%20Biodiversidad%20en%20Campeche.%20Estudio%20de%20Caso.pdf&tipo=paginas>
- Yáñez-Arancibia, Alejandro, Day, John W., Twilley, Robert R., & Day, Richard H., 2014. Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques*, 20, 39-75, ISSN 2448-7597
- Zavala-Hidalgo, J., de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, R. Hernández Maguey F., 2011. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 315-334. 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 (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p, ISBN 978-607-606-416-0

