



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES LITORALES EN LAS BOCAS DE
LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(GEOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:

MARCIA SAMIA SANTANA CARRILLO

TUTOR PRINCIPAL:

DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA
(UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA)

COMITÉ TUTOR:

DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DRA. MARÍA LUISA MACHAÍN CASTILLO
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DR. JOHN SELVAMONY ARMSTRONG-ALTRIN
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DR. FRANCISCO GUTIERREZ MENDIETA
(UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA)

ASESOR EXTERNO:

M. EN C. MARGARITO ÁLVAREZ RUBIO
(COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES-PLANTEL SUR-UNAM)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., AGOSTO, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES LITORALES EN LAS BOCAS DE LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(GEOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:
MARCIA SAMIA SANTANA CARRILLO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA
(UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA)

COMITÉ TUTOR:
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DRA. MARÍA LUISA MACHAÍN CASTILLO
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DR. JOHN SELVAMONY ARMSTRONG-ALTRIN
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA-UNAM)

DR. FRANCISCO GUTIERREZ MENDIETA
(UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA)

ASESOR EXTERNO:
M. EN C. MARGARITO ÁLVAREZ RUBIO
(COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES-PLANTEL SUR-UNAM)

MÉXICO, CD. MX., AGOSTO 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Autónoma de México UNAM por todas las facilidades otorgadas, en especial a su personal Técnico-Administrativo: Diana Juárez Bustos, Guadalupe Godoy Medina y Gabriela Almaraz Mejía por su apoyo para la realización de los trámites escolares y de la beca.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por la Beca Nacional de Maestría N° 515210/289335 recibida para realizar los estudios de Posgrado.

Al Dr. Antonio Z. Márquez-García por su apoyo y guía para la realización y conclusión de esta tesis. Al Comité tutor integrado por los Doctores Miguel Ángel Alatorre Mendieta, María Luisa Machain Castillo, John Selvamony Armstrong-Altrin, Francisco Gutierrez Mendieta y al M. En C. Margarito Álvarez Rubio por sus comentarios y sugerencias que enriquecieron este proyecto.

Al Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos GEOMAR, por los datos de batimetría y corrientes de Laguna de Términos, así como por todo el apoyo otorgado.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi madre y hermana por su apoyo invaluable y alentarme todos los días a continuar.

Al M. en C. Leonid I. Márquez García por toda su ayuda y apoyo.

A toda mi familia aunque a la distancia, por estar siempre.

Nunca habrás disfrutado del mundo correctamente hasta que el mar fluya por tus venas y hasta que estés vestido con los cielos y coronado con las estrellas

Thomas Traherne

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS.....	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ANTECEDENTES.....	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS.....	13
4.1 General.....	13
4.2 Particulares.....	13
5. ÁREA DE ESTUDIO	14
5.1 Características abióticas y bióticas de la laguna de Términos.....	15
5.2 Características morfológicas e hidrodinámicas de las bocas de la laguna de Términos...	17
6. MATERIAL Y MÉTODOS.....	23
6.1 Trabajo de campo	23
6.2 Trabajo de laboratorio	26
6.3 Trabajo de gabinete	27
7. RESULTADOS.....	33
7.1 Evolución de la línea de costa.....	33
7.2 Análisis morfológico de las bocas lagunares.....	46
7.3 Variación de los sedimentos litorales de las bocas lagunares	53
7.4 Síntesis de la morfología y granulometría de las bocas lagunares	56
7.5 Identificación de fenómenos hidrometeorológicos extremos	61
7.6 Índice de fragilidad ambiental de la zona litoral.....	66
8. DISCUSIÓN.....	69
8.1 Variaciones en el litoral de la Boca del Carmen	69

8.2 Variaciones en el litoral de la Boca de Puerto Real.....	70
8.3 Efectos producidos por ciclones tropicales.....	72
8.4 Fragilidad de las bocas de Lagunas de Términos	72
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Ubicación geográfica de Laguna de Términos, y las bocas del Carmen y Puerto Real, Campeche.....	14
Figura 5.2. Batimetría de la Laguna de Términos (Datos proporcionados por el Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos, Geomar, 2019).	19
Figura 5.3. Hidrodinámica de la Laguna de Términos (Datos proporcionados por el Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos, Geomar, 2019).	22
Figura 6.1 Ubicación de los perfiles de playa levantados en abril y septiembre de 2014.	23
Figura 6.2. Levantamiento de perfiles de playa por nivelación diferencial simple (Modificado de Márquez-García, 2002).	25
Figura 6.3 Corte esquemático de un perfil de playa (Modificado de Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994).	26
Figura 6.4. Creación del mosaico de cada una de las bocas lagunares, sitio El Zacatal.....	29
Figura 7.1. Desplazamiento de la línea de costa de El Zacatal durante el período 2005-2013. .	35
Figura 7.2. Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m ²) en El Zacatal durante el período de 2005-2013 y ubicación de las áreas analizadas.	36
Figura 7.3. Desplazamiento de la línea de costa de Playa Norte durante el período de 2005-2013.	38
Figura 7.4 Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m ²) en Playa Norte durante el período de 2005-2013 y ubicación de las áreas analizadas.....	39
Figura 7.5. Desplazamiento de la línea de costa de Puerto Real durante el período de 2004-2013.	41
Figura 7.6 Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m ²) en Puerto Real durante el período de 2004-2013 y ubicación de las áreas analizadas.	42
Figura 7.7. Desplazamiento de la línea de costa de Isla Aguada durante el período de 2007-2012.	44
Figura 7.8. Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m ²) en Isla Aguada durante el período de 2007-2012 y ubicación de las áreas analizadas.	45
Figura 7.9. A) Diagramas de los perfiles de playa 1 al 3 levantados en El Zacatal. B) Variación del ancho de la playa.	46
Figura 7.10. Playa El Zacatal, se observa que los gaviones colocados para proteger el sitio, han sido derribados por efecto del oleaje presente en la zona.	47
Figura 7.11. Diagrama de los perfiles de playa 4 y 5 levantados en Playa Norte. B) Variación del ancho de la playa.	47
Figura 7.12. Canal de marea formado en Playa Norte.....	48

Figura 7.13. Diagrama de los perfiles de playa 6 al 9 levantados en Puerto Real. B) Variación del ancho de la playa. 49

Figura 7.14. Diagrama de los perfiles de playa 10 al 11 levantados en Puerto Real. B) Variación del ancho de la playa. 50

Figura 7.15. Sitio Puerto Real. Manglares derribados por efecto de la erosión de la playa. Al fondo se observa como la playa ha retrocedido hasta alcanzar una casa. 50

Figura 7.16. Diagrama de los perfiles de playa 12 al 14 levantados en Isla Aguada. B) Variación del ancho de la playa. 51

Figura 7.17. Playa de Isla Aguada, donde se observa que la amplitud y forma no presentó variaciones entre los muestreos (secas y lluvias, 2014). 52

Figura 7.18. Diagrama de los perfiles de playa 15 al 17 levantados en Isla Aguada. B) Variación del ancho de la playa. 53

Figura 7.19. Distribución del tamaño de grano de los sedimentos en las bocas lagunares. 55

Figura 7.20. Balance neto del desplazamiento de línea de costa en El Zacatal, Playa Norte, Puerto Real e Isla Aguada, Campeche durante el periodo 2004-2013. 57

Figura 7.21. Cambios morfológicos observados en la “lengüeta” ubicada en Playa Norte, Campeche del 2005 al 2016. 58

Figura 7.22. Cambios morfológicos observados cerca del puerto pesquero de Playa Norte, por la presencia de una escollera (flechas amarillas). En el 2016, las flechas azules indica la presencia de nuevas estructuras. 59

Figura 7.23. Trayectoria de los principales ciclones tropicales que afectaron Ciudad del Carmen, Campeche: En el recuadro a) Huracán 2 Ernesto (2012); b) Huracán 5 Dean (2007); c) Huracán 3 Roxanne (1995) y d) Huracán 1 Brenda (1973). Los datos de las trayectorias fueron tomados de <https://www.coast.noaa.gov/hurricanes/>. 65

Figura 7.24. Fragilidad ambiental de las bocas lagunares de Laguna Términos. 68

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Coordenadas de los perfiles de playa en las bocas lagunares.....	24
Tabla 6.2 Límites de los parámetros granulométricos (Modificado de Folk, 1974).....	27
Tabla 6.3. Imágenes utilizadas para el análisis histórico.	28
Tabla 6.4. Valoración de los parámetros para calcular el índice de fragilidad de cada sitio.	31
Tabla 7.1. Áreas de erosión y acreción de la zona costera El Zacatal, Campeche durante el periodo 2005-2013.	34
Tabla 7.2. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Playa Norte, Campeche durante el periodo 2005-2013.	37
Tabla 7.3. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Puerto Real, Campeche durante el periodo 2004-2013.	40
Tabla 7.4. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Isla Aguada, Campeche durante el periodo 2007-2012.	43
Tabla 7.5. Balance neto del desplazamiento de línea de costa en las bocas de El Carmen y Puerto Real, Campeche durante el periodo 2004-2013.	57
Tabla 7.6. Ciclones tropicales (CT) que impactaron en Campeche y sus proximidades de 1892-2014.	62
Tabla 7.7. Superficies consideradas para evaluar los diferentes componentes del IFA.	66
Tabla 7.8. Índice de Fragilidad obtenido para cada sitio.	67
Tabla 7.9. Intervalos de las categorías de fragilidad obtenidas.....	67

RESUMEN

Las lagunas costeras se desarrollan en la interface de los ecosistemas terrestres y marinos, en las que se produce intercambio de materia y energía: Pueden ser áreas semicerradas conectadas con el océano por medio de las bocas o canales y están protegidas por algún tipo de barrera. En la porción mexicana del Golfo de México la Laguna de Términos es la de mayor volumen con una profundidad promedio de cuatro metros y está conectada al mar a través de las bocas del Carmen y la de Puerto Real. En este estudio se evaluaron las variaciones litorales que presentan las bocas de la laguna mediante la estimación de tasas de erosión-acreción a través del análisis de la línea de costa de los años 2004-2013, en donde los sitios El Zacatal y Puerto Real presentaron tasas de erosión alrededor de 1 m/año, mientras en Playa Norte e Isla Aguada el proceso dominante fue la acreción con tasas de 0.20 y 0.9 m/año, respectivamente. También se realizaron levantamientos de perfiles de playa y colecta de sedimentos durante las temporadas de secas y lluvias de 2014 (abril y octubre). Durante ambas temporadas en los sitios el Zacatal y Puerto Real se observó una disminución de la amplitud de la playa y un aumento de la pendiente, con variaciones de los sedimentos de muy gruesos a finos. Respecto a Playa Norte e Isla Aguada los perfiles de playa mostraron que la pendiente y la amplitud de la playa se mantuvieron homogéneas durante ambas temporadas, con variaciones de arenas gruesas a arenas finas en Playa Norte y con arenas muy gruesas a medias en Isla Aguada.

Además se realizó un análisis de los principales fenómenos hidrometeorológicos que han afectado la zona de estudio. Y finalmente considerando estas variables se realizó un análisis de la fragilidad ambiental que presentan las bocas lagunares, evidenciando que los sitios de El Zacatal, Playa Norte e Isla Aguada presentaron una fragilidad ambiental baja, mientras que, Puerto Real presentó una fragilidad alta.

ABSTRACT

Coastal lagoons are developed at the interface of terrestrial and marine ecosystems, where there is an exchange of matter and energy. They can be semi-closed areas connected to the ocean by means of the mouths or channels and are protected by some type of barrier. In the Mexican portion of the Gulf of Mexico, the Laguna de Términos is the greater volume with an average depth of four meters and is connected to the sea through the mouths of Boca del Carmen and Boca de Puerto Real. In this study the littoral variations of the mouths of the lagoon were evaluated by estimating erosion-accretion rates through the analysis of the coastal line of the years 2004-2013, where El Zacatal and Puerto Real sites presented erosion rates around 1 m/y, while in Playa Norte and Isla Aguada the dominant process was the accretion with rates of 0.20 and 0.9 m/y, respectively. There were also beach profiles and sediment collection during the dry and rainy seasons of 2014 (April and October). During both seasons at the Zacatal and Puerto Real sites, there was a decrease in the amplitude of the beach and an increase in the slope, with variations of sediments from very coarse to fine. In regard to Playa Norte and Isla Aguada, the profiles of Beach showed that the slope and the width of the beach remained homogeneous during both seasons, with variations of coarse sands to fine sands in Playa Norte and with very thick sands to medium sands in Isla Aguada.

In addition, an analysis was made of the main hydrometeorological phenomena that have affected the study area. And finally, considering these variables, an analysis of the environmental fragility of the lagoon mouths was made, evidencing that the sites of El Zacatal, Playa Norte and Isla Aguada presented a low environmental fragility, while Puerto Real presented a high fragility.

1. INTRODUCCIÓN

En la región costera, la franja litoral es una de las zonas más dinámicas, ya que la morfología cambia en respuesta a la acción del oleaje y las corrientes marinas, así como a procesos continentales (transporte y aporte de sedimentos), causando diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, así como en el tamaño y composición de los sedimentos que las constituyen (Montaño *et al.*, 1988).

Krumbein y Sloss (1963) mencionan que los procesos costeros que afectan al litoral ocurren en distintas escalas de tiempo que varían desde instantes (horas) hasta intervalos geológicos (miles o más años). Estos procesos que modifican la dinámica litoral, tales como la variación del aporte de sedimentos y los cambios de energía por efecto del oleaje y las corrientes causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, las cuales varían en el transcurso del año. También la actividad antropogénica, juega un papel muy importante al modificar la zona litoral, ya que se altera la morfología y el transporte de sedimentos por la construcción de infraestructura urbana, turística (como hoteles y restaurantes), portuaria y de “protección”.

La comprensión de los procesos costeros requiere del estudio de la dinámica que actúa sobre la zona litoral y es necesario considerar las diferentes escalas espacio-temporales que permitan distinguir la combinación de aquellos más relevantes que se presentan.

Las lagunas costeras son unidades morfológicas acuáticas de baja profundidad, que se desarrollan en la interface entre los ecosistemas terrestres y marinos, en las que se produce intercambio de materia y energía. Pueden ser áreas semicerradas conectadas con el océano y protegidas por algún tipo de barrera, con un aporte de agua dulce proveniente de los ríos que acarrea materiales disueltos y suspendidos, además son afectadas por las mareas, que ejercen una considerable influencia a través de la mezcla y turbulencia que generan, además presentan gradientes horizontales, debido al flujo de dos capas de agua: las de menor densidad en la parte superior con una dirección hacia el mar y la de mayor densidad por debajo de ésta hacia el interior (Yáñez-Arancibia, 1986). Los sedimentos gruesos se encuentran en las bocas, donde las velocidades de las corrientes tienen su máximo, mientras que los sedimentos finos se encuentran en los extremos interiores ya que las velocidades son mínimas. La formación de bajos y canales está relacionada con el proceso de sedimentación, las propiedades físico-químicas del sedimento, así como el origen del mismo (Botello *et al.*, 2010). Las barreras cambian en su estructura, las bocas lagunares generalmente migran en dirección a la corriente de deriva litoral prevaleciente, la actividad de depósito generada por ésta última y el oleaje, junto con el transporte de sedimentos y la estacionalidad de los ríos, provoca que algunas lagunas se abran y otras se cierren al mar (bocas efímeras) (Yáñez-Arancibia, 1986).

La influencia de las mareas sobre la laguna está controlada principalmente por el tamaño de la cuenca, el rango de marea y la morfología de las bocas lagunares. En lagunas someras, la onda de marea puede ser frenada antes de que llegue a la propia laguna, mientras que, en aquellas con canales profundos y un gran rango de marea, puede detectarse en todas las áreas.

La Laguna de Términos es la de mayor volumen en la porción mexicana del Golfo de México, con una profundidad promedio de cuatro metros, se conecta al mar a través de la Boca de Puerto Real, (que tiene un ancho promedio de 3.2 km, y es de aguas transparentes) y la Boca del Carmen (con un ancho promedio de 3.8 km, la cual es influenciada por el Río Palizada, donde la resuspensión de sedimentos terrígenos finos genera turbidez) (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994). La predominancia de vientos del sureste aunada con la dirección de los aportes dulceacuícolas, produce un efecto neto de exportación de agua fluvial hacia la Laguna de Términos y de ésta al Golfo de México, principalmente a través de la boca del Carmen (boca occidental) y una mayor entrada del agua marina en dirección Suroeste a Sureste por la boca de Puerto Real (boca oriental). En invierno la presencia de vientos del norte produce un efecto de retención del agua fluvial e incluso favorece el ingreso de agua marina a los ecosistemas estuarinos. Por lo somero de la cuenca, los vientos en general efectúan una importante mezcla vertical en la columna de agua, provoca la resuspensión de sedimentos y nutrientes autóctonos y alóctonos, que son finalmente exportados a la plataforma continental del Banco de Campeche, enriqueciendo su productividad primaria. Los vientos predominantes de la región que modulan la circulación superficial son los vientos del norte, que dan origen a una circulación anticiclónica, mientras que los vientos del sureste dan origen a una circulación ciclónica. La corriente litoral del sistema fluye de manera predominante hacia el occidente. Las corrientes en el canal del Carmen varían de menos de 20 a más de 65 cm/s durante las mareas bajas y hasta 86 cm/s durante las mareas altas, acompañadas ambas por la descarga del flujo de los ríos. En este canal las corrientes dominantes se dirigen hacia el mar debido a la influencia de la descarga de los ríos y a que las desembocaduras están localizadas a corta distancia del canal (Yáñez-Correa, 1969).

2. ANTECEDENTES

Se han realizado numerosas investigaciones en el litoral del Golfo de México, y en el caso de la Laguna de Terminos sobre aspectos geológicos, como los de Bouma (1971) y Campos-Castán (1981) quienes reportan la presencia de dos tipos de ambientes sedimentarios y una zona de transición bien definida: el primero es el terrígeno ubicado en la plataforma continental de Campeche, y el segundo es el carbonatado en la plataforma de Yucatán y parte de Campeche, mientras que la zona de transición se encuentra frente a la Laguna de Términos. En el trabajo de Carranza-Edwards *et al.*, (1993) se diferencian las provincias antes mencionadas, además reportan que la concentración de sedimentos suspendidos más importante se ubica cerca de la desembocadura del Sistema Grijalva- Usumacinta y es similar para la época de secas y la de nortes.

Así mismo, incorporando el empleo de imágenes de satélite para determinar los cambios geomorfológicos y tasas de erosión de la línea de costa, Ortiz-Pérez (1992), mostró que los eventos hidrometeorológicos extremos como los huracanes son responsables de estos cambios, modificando las costas de Tabasco y Campeche. También, se han llevado a cabo estudios que evalúan de manera integral la dinámica costera, integrando el uso de imágenes de satélite para cuantificar las tasas de erosión y los cambios geomorfológicos de la línea de costa, así como de perfiles de playa y muestreos de sedimentos de la zona litoral, ejemplo de ello es el realizado por Márquez-García (2011), en el cual determinó los procesos de erosión-acreción a lo largo del litoral de Campeche, incluyendo las bocas lagunares. Botello *et al.*, (2010), mencionan que las alteraciones a la dinámica costera, llevan a la desestabilización de la misma, haciéndola susceptible a los impactos de origen natural (huracanes, inundaciones, incremento del nivel del mar, erosión, etc.) y a los de origen antropogénico (obras civiles, contaminación, sobrepesca, cambio de uso del suelo, etc.), y, por lo tanto, considerándose como ecosistemas frágiles (Begon *et al.*, 1988; Toledo, 2011, INECC, 2013).

Dentro del marco de cambios morfológicos en el litoral, el concepto de fragilidad ambiental cobra relevancia para explicar cómo las amenazas naturales tienen una manifestación en un espacio específico y en un tiempo determinado, incluyéndose el conjunto de respuestas de los componentes del ambiente ante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. Este último adquiere una dimensión fundamental en términos preventivos, de mitigación de daños y de planificación del territorio porque permite delimitar a nivel local los peligros reales y potenciales, diferenciando los componentes del sitio, que por su naturaleza intrínseca favorecen o inhiben los efectos destructivos de un fenómeno dado (Calvo, 1984).

3. JUSTIFICACIÓN

Las lagunas costeras son ecosistemas que se desarrollan en la interface marina-terrestre, teniendo características particulares que dependen de la interacción de procesos hidrológicos y marinos (patrones de circulación, oleaje y mareas) y continentales (transporte y aporte de sedimentos), permitiendo una comunicación permanente o efímera con el mar mediante las bocas lagunares. Estas características permiten el establecimiento de diferentes ecosistemas modificando al mismo tiempo estos procesos. Aunado a esto, el establecimiento de asentamientos humanos y los cambios de uso de suelo aceleran o modifican los procesos costeros, causando el deterioro de los ecosistemas y exponiendo a las poblaciones humanas a un mayor efecto de los eventos meteorológicos extremos.

Por lo que se considera importante evaluar estas características y determinar su fragilidad ante eventos naturales extremos e impactos humanos.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar las variaciones en el litoral de las bocas lagunares de la Laguna de Términos y analizar la fragilidad ambiental de esta zona ante el efecto de fenómenos hidrometeorológicos e impactos antropogénicos durante el periodo de 2004 al 2014.

4.2 Particulares

1. Realizar un análisis histórico de la variación de la línea de costa del periodo de 2004-2012 y determinar la tasa de erosión-acreción en las bocas lagunares.
2. Analizar la geomorfología de las playas de las bocas lagunares durante 2014 para determinar los procesos de erosión-depósito presentes en la zona litoral de las bocas lagunares.
3. Caracterizar los sedimentos de la zona de estudio de los años 2005-2007, 2013 y 2014 en las temporadas de nortes, secas y lluvias.
4. Realizar un análisis histórico de los fenómenos hidrometeorológicos que han afectado la zona de estudio.
5. Calcular el índice de fragilidad ambiental de las bocas lagunares a partir de los resultados de los análisis previos.

5. ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Términos se encuentra ubicada en la zona costera del estado de Campeche, entre los 18°03'27" y 19°10'35" de Latitud Norte y los 92°28'38" y 91°03'16" de Longitud Oeste. Se ubica entre los ríos San Pedro y San Pablo al occidente, y el área de drenaje del estero Sabancuy hacia el oriente, cubriendo una superficie de 705,016 ha. Incluye el municipio de El Carmen y parte de los municipios de Palizada, Escárcega y Champotón. Es un área natural protegida con la categoría de "Área de Protección de Flora y Fauna" (APFF) (Instituto Nacional de Ecología INE, 1997), considerada como de especial relevancia en el país por la riqueza de sus especies y la integridad de sus ecosistemas, se incorporó al Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP) en 2016 (SEMARNAT, 2016) (Figura 5.1).

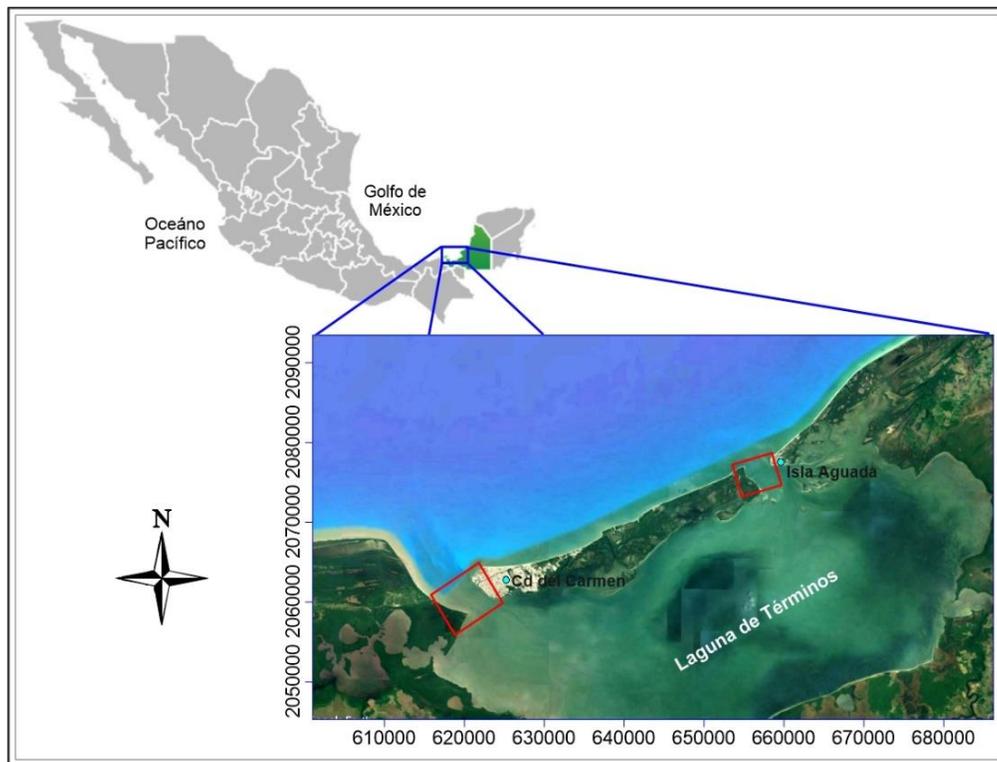


Figura 5.1 Ubicación geográfica de Laguna de Términos, y las bocas del Carmen y Puerto Real, Campeche.

Ciudad del Carmen es el principal centro de población del área natural protegida, ya que la mayor parte de la población del municipio (76.6%, 169,466 habitantes) se concentra en el extremo occidental de la Isla del Carmen (INEGI, 2010), además en el municipio se ubican otras 11 localidades con más de 1,000 habitantes: Sabancuy, Nuevo Progreso, Isla Aguada, San Antonio Cárdenas, Atasta, Chicbul, Chekubul, Aguacatal, Abelardo L. Rodríguez, Francisco Villa y Colonia Emiliano Zapata.

El acceso al APFF Laguna de Términos puede realizarse por tres vías: 1) aérea, a través del aeropuerto internacional y un helipuerto ubicados en Ciudad del Carmen; 2) marítima, a través del puerto Laguna Azul y 3) terrestre, a través del puente "La Unidad", ubicado al norte de Isla de Carmen y en la parte sur por el puente "El Zacatal", que es el más largo en Latinoamérica y que enlaza a la isla con la Península de Atasta.

5.1 Características abióticas y bióticas de la laguna de Términos

La Laguna de Términos, presenta las siguientes características abióticas y bióticas:

Fisiografía

Forma parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo, mientras la plataforma continental que está frente a la laguna pertenece a los extremos sureste y suroeste de las provincias geológicas de Bahía de Campeche (que es una extensión marina de la Cuenca Macuspana-Tabasco) y la Sonda de Campeche (que es una amplia plataforma carbonatada hacia la subprovincia de la Península de Yucatán y terrígena hacia la subprovincia de la Zona Pantanosa de Tabasco) (Álvarez, 1961).

De acuerdo a la clasificación de Lankford (1977), la Laguna de Términos pertenece al Tipo II-A (Sedimentación terrígena diferencial), el cual, presenta sistemas deltaicos fluviales producidos por la sedimentación irregular o subsidencias de superficie, formando barreras arenosas que rodean depresiones marginales o intradeltaicas muy someras, el escurrimiento puede ser directo o entrar a la lagunas a través de ensenadas. En este tipo de sistema ocurren rápidamente modificaciones en la forma y batimetría y generalmente la energía es baja (excepto en los canales y ensenadas).

Edafología

La cuenca de la Laguna de Términos es el remanente de un cuerpo lagunar más grande, el cual es rellenado por el aporte de los sedimentos y el desarrollo de llanuras aluviales de los ríos que fluyen hacia las riberas sur y occidente, así como por la acreción orgánica. La barrera litoral está integrada por varias cadenas de antiguas líneas de playa. La zona de estudio presenta seis tipos principales de suelo: gleysol eútrico y mólico, feozem calcárico, solonchack gléyico, regosoles eútricos y calcárico, histosol y vertisol pélico, los cuales tienen distintas características que permiten o no la fertilidad para la práctica de actividades agrícolas y ganaderas, así como el desarrollo de diversas comunidades vegetales como son selvas, pastizales, popales, tulares y manglares (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994).

Clima

La región de la Laguna de Términos presenta tres tipos climáticos de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988): a) cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano ($Aw_1(w)$) en la parte que corresponde a Isla Aguada; b) clima cálido subhúmedo con mayor humedad ($Aw_2(w)$) en la parte que rodea a la Laguna de Términos (incluyendo a Isla del Carmen); y c) cálido húmedo (el más húmedo de los subhúmedos) con abundantes lluvias en verano ($Am(f)$) en las zonas de Palizada, Pom-Atasta hasta el río San Pedro.

Hidrología

En la región de la Laguna de Términos desemboca parte de la red hidrológica más importante del Golfo de México, la cual está constituida por los ríos Mezcalapa, Grijalva y Usumacinta, a su vez estos ríos han desarrollado un vasto complejo fluvio-lagunar deltaico formado por los sistemas: San Pedro y San Pablo-Atasta-Pom; Palizada-del este; Chumpán-Balchacah Candelaria-Panlau.

Flora

Esta zona tiene una gran diversidad de asociaciones vegetales tanto terrestres como acuáticas, como las de dunas costeras, manglares, tulares, carrizales, popales, selva baja inundable, matorral espinoso inundable, vegetación riparia, selva alta-mediana, vegetación secundaria y pastos marinos, éstos últimos constituidos principalmente por la especie de *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae). Se cuenta con registro de al menos 84 familias vegetales con un total de 374 especies (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994), de las cuales siete están catalogadas como Amenazadas: *Bletia purpurea* (Orchidaceae), *Bravaisia integerrima* y *B. tubiflora* (Acanthaceae), y las especies de mangle *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erecta* (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994; INE, 1997; Bonilla-Barbosa, 2007; SEMARNAT, 2010, 2016; SIMEC, 2018).

Fauna

Por su parte, la diversidad faunística está representada por lo menos por 1468 especies entre terrestres y acuáticas, siendo los vertebrados los mejor representados con 147 especies. De estos registros 30 corresponden a especies endémicas para el país, como el ofiuero *Amphiodia guillermosoberoni*, la sardina lacha *Brevoortia patronus* además 89 se encuentran consideradas en los listados de especies raras, amenazada o en peligro de extinción (INE, 1997; Portal de Datos Abiertos UNAM, 2015; SEMARNAT, 2016; SIMEC, 2018).

5.2 Características morfológicas e hidrodinámicas de las bocas de la laguna de Términos

Morfología

Isla del Carmen. Es una barrera o cordón de arena litoral que separa a la laguna de Términos del mar abierto. Morfológicamente, presenta varios sistemas de cerros de playas paralelos, curvados o discordantes, las depresiones que se forman entre estos, así como los canales y deltas de intermarea y los depósitos de abanicos aluviales ocasionados por las tormentas, son los rasgos característicos de la isla. Según Yáñez-Correa (1969) la barrera litoral comenzó a formarse por la acumulación de material arenoso acarreado lateralmente por las corrientes y el oleaje sobre la plataforma continental, dando origen a depósitos incipientes de arena (islas) en forma de “gancho”, tómbolos o flechas litorales, que estuvieron separadas por canales de intermarea y que han sido azolvados por depósitos de “abanicos de deslave”, relacionándose así el origen de la laguna de Términos con la formación de la barrera litoral.

La zona de la barrera litoral que se encuentra hacia el interior de la laguna está caracterizada por depósitos de pantano. Mientras que los canales (bocas) del Carmen y Puerto Real se mantienen abiertos por las corrientes intermareales, las corrientes de deslave generadas por las tormentas y el flujo de la descarga de los diversos ríos. Así mismo, de acuerdo a Yáñez-Correa (1969), la forma y dimensión de Isla del Carmen ha variado en el tiempo, es decir, que “crece” de acuerdo con la dirección del transporte litoral hacia el oeste, mientras que, en su extremo oriental se ha erosionado dando lugar a la configuración alargada que presenta actualmente. En el caso de las bocas, se han estrechado por la forma en que se han depositado los sedimentos en forma de gancho hacia la boca del Carmen y en Isla Aguada la desviación es hacia la boca de Puerto Real.

Los sedimentos que forman Isla del Carmen están constituidos principalmente por sedimentos de tipo biogénico como fragmentos de conchas (Yáñez-Correa, 1969), siendo el resultado de la actividad bentónica de la plataforma de Campeche, de donde son acarreados por la corriente de Yucatán hacia el oeste.

Esta sedimentación declina hacia el oeste de la boca del Carmen, donde dominan los sedimentos terrígenos finos los cuales son arrastrados hacia la laguna por los ríos Chumpán y Palizada, mientras que, hacia mar abierto son vertidos por el sistema Grijalva-Usumacinta y el río San Pedro (Yáñez-Correa, 1969, Yáñez-Arancibia *et al.*, 1994).

Boca del Carmen. La superficie de la planicie costera a la que pertenece la boca del Carmen está constituida por los cerros de playa que se extienden hacia el poniente de la misma,

desarrollándose de forma paralela a la línea de costa. Estos cerros fueron originados por la acumulación sucesiva de depósitos en épocas de tormenta y de calma y difieren de los de isla del Carmen, en dimensión, número de cresta y en la composición, siendo principalmente arcillas limosas con arenas cuarzosas muy finas y menor cantidad de conchas (Yáñez-Correa, 1969). Además de este complejo, el desarrollo de depósitos deltaicos hacia la parte marina se encuentra controlado por los procesos de erosión, la rompiente de las olas y las corrientes litorales. A esto se suma el gran aporte de agua descargada por los ríos Chumpán y Palizada que mantienen la circulación constante de la laguna hacia el mar.

Boca de Puerto Real. Morfológicamente la boca de Puerto Real está formada por un sistema de cordones de playa y dunas. Así mismo, en la Punta de Puerto Real se encuentran afloramientos rocosos de calcarenitas y coquinas que sirven de barreras contra la alta energía del oleaje y las corrientes, pero que eventualmente son erosionadas (Jiménez, 1979). De acuerdo con Jiménez (1979), en la parte interna de la boca se encuentra el delta de flujo de marea que demuestra la continua entrada de agua procedente del Golfo de México hacia el interior de la laguna. Este bajo está formado por tres grupos de bajos y canales. Los primeros presentan una morfología alargada con una parte más ancha y otra delgada en forma de punta, que indica la dirección del flujo, los segundos van paralelos a los bajos. Este delta se ha extendido por el depósito de sedimentos los cuales son transportados hacia la laguna a través de la boca por la marea y la corriente de deslave producida en época de nortes (Yáñez-Correa, 1969, Ayala-Castañares, 1990).

De acuerdo con datos de batimetría proporcionados por el Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos (Geomar, 2019) hacia el interior de la Laguna de Términos cerca de las desembocaduras de los ríos se presentan profundidades de entre 1 y 3 m, mientras que hacia el centro de la laguna las profundidades son de aproximadamente 4 m. Por otro lado, en la boca del Carmen, la batimetría presenta diferencias ya que en la margen oeste cerca de la Punta Zacatal las profundidades varían entre 1 y 3 m, en el centro de la boca se incrementan las profundidades entre 5 y 9 m, y en la margen este cerca de Cd del Carmen se presenta un canal con profundidades próximas a los 14 m. En la costa interior de isla del Carmen se presenta una planicie con profundidades que varían entre 1.5 m y 2 m. (Figura 5.2).

En la boca de Puerto Real, en su extremo oeste y cerca de la costa las profundidades varían entre 1 y 3 m y se extienden hacia el interior de la misma cerca del sitio conocido como Punta San Julián. En el centro de la boca y hacia su margen este las profundidades varían entre 4 y 7 m, hasta donde se presenta un canal con profundidades aproximadas de 9 m. Hacia el interior

de la laguna se localiza una zona de bajos que presentan profundidades menores a 1.5 m, extendiéndose hacia el interior del estero de Sabancuy (Figura 5.2).

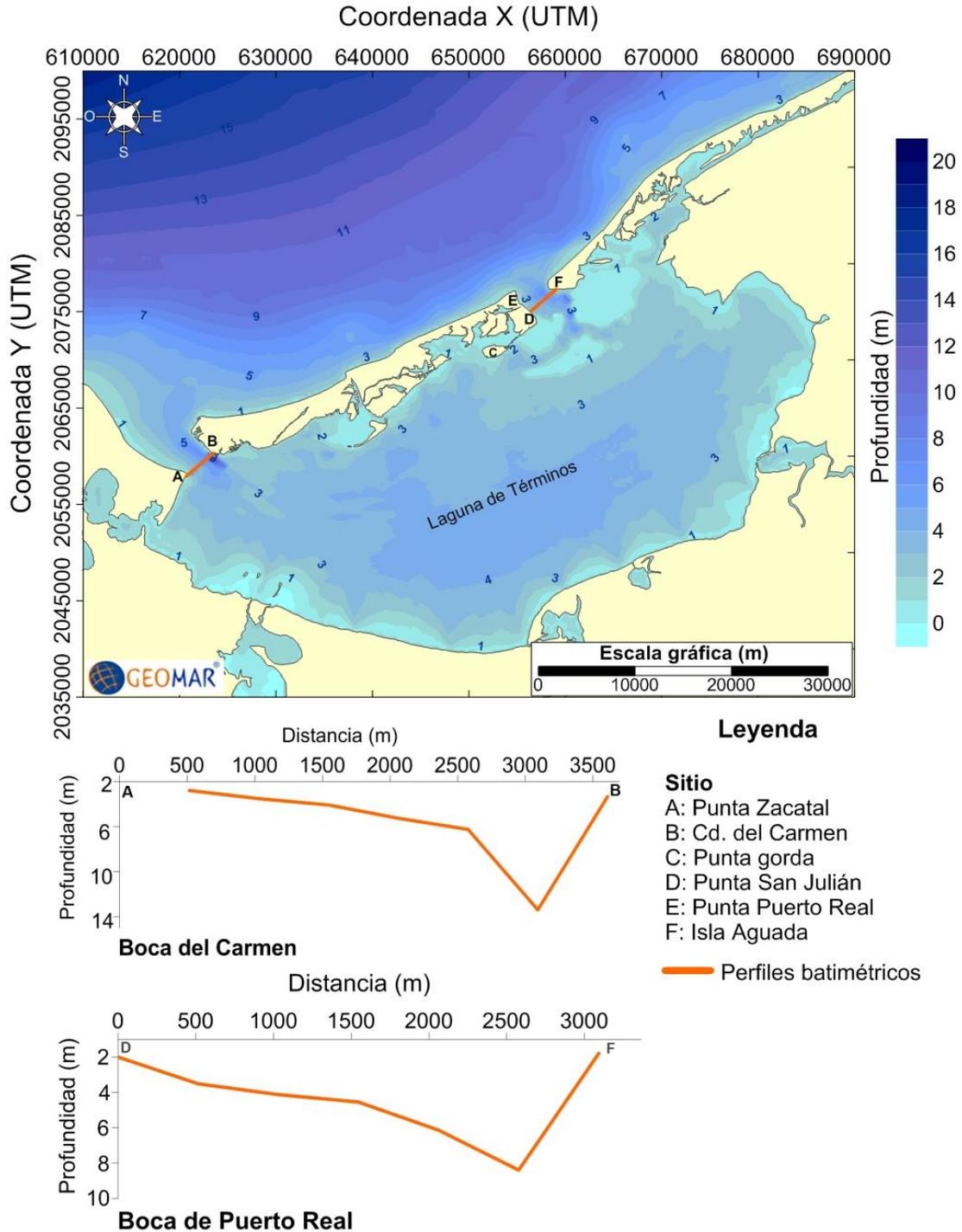


Figura 5.2. Batimetría de la Laguna de Términos (Datos proporcionados por el Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos, Geomar, 2019).

Circulación, corrientes, marea

El sistema de corrientes en el Golfo de México se origina en el Mar Caribe, siendo la de mayor escala la Corriente de Lazo (localizada en la parte oriental) que une la corriente de Yucatán con la de Florida mediante un giro anticiclónico (parte occidental del golfo) (Nowlin y McLellan, 1967). A su vez esta circulación está condicionada tanto por el viento, como por el transporte de masas que entra por el Canal de Yucatán y por la presencia de una surgencia estacional en la plataforma de Yucatán (Monreal-Gómez et al., 2004).

La magnitud de las corrientes en el Golfo de México no es muy variable. Los valores máximos se presentan en el Canal de Yucatán, donde las corrientes llegan a alcanzar los 4 nudos (aproximadamente 2 m/s). En la Sonda de Campeche, las corrientes son considerablemente moderadas y sus magnitudes no llegan a alcanzar 1 nudo (aproximadamente 0.5 m/s).

Considerando los patrones anuales de temperatura, precipitación y el régimen de vientos, se han determinado tres periodos de tiempo climáticos: “lluvias”, que corresponde a los meses de junio a octubre; “nortes” que es de octubre a febrero, y por último, el periodo de “secas”, de febrero a mayo (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1986).

Los sistemas atmosféricos de incidencia anual conocidos como “nortes”, se caracterizan por la intensidad de sus vientos (de componente norte) con la que ingresan a la vertiente del Golfo de México e impactan sobre las zonas costeras, generando precipitaciones ligeras las cuales duran de dos a tres días y un descenso de la temperatura; de esta manera transforman e influyen en la dinámica del comportamiento de las aguas oceánicas como los niveles de marea, oleaje, temperatura superficial del mar, entre otros (Gómez y Reséndiz, 2002).

Por otro lado, en la Bahía de Campeche se presentan dos tipos de marea, la marea diurna que se localiza desde el noreste de Yucatán hasta Coatzacoalcos y marea mixta con dominancia diurna que se encuentra desde el noroeste de Coatzacoalcos hasta el norte de Matamoros. Sin embargo, frente a Campeche la marea es semi-diurna (Salas-de-León y Monreal-Gómez, 1997). Presentan amplitudes pequeñas, no obstante, el desnivel de la superficie del mar genera transportes de masa relativamente fuertes, los cuales juegan un papel importante en el transporte de material en suspensión (Salas-de-León y Monreal-Gómez, 1997).

Las mareas, la descarga de agua dulce y los vientos locales son mecanismos importantes que fuerzan la circulación y la dispersión en la laguna. Un modelo preliminar de la circulación del agua en la laguna muestra un patrón complejo en el cual las áreas oriental y occidental de la Laguna de Términos actúan mayormente de manera independiente, y el tiempo de residencia del agua varía entre uno y cinco meses. Estos patrones, juegan un papel importante en la

productividad del sistema, ya que ésta depende en gran medida del aporte de agua dulce que ingresa a él y de los ciclos meteorológicos anuales.

Mancilla y Vargas (1980) observaron que el flujo neto de las aguas en el interior de la laguna es predominante hacia el oeste. La circulación dentro de la Laguna de Términos, se debe principalmente a cambios en la marea en las bocas de Puerto Real y Carmen, así como a los patrones de viento estacionales, ya que, durante las estaciones seca y lluviosa, hay un flujo de agua neto de este a oeste. Mientras que, durante la estación de vientos “nortes” el viento aumenta de magnitud y cambia de dirección, por lo que, la circulación invierte su dirección y se vuelve turbulenta.

CONACyT-ANIDE (2012), reportaron en las temporadas de nortes y lluvias del 2011 para la boca de Puerto Real una velocidad promedio de flujo de 0.58 y 0.3 m/s y las velocidades medias de reflujos entre 0.3 y 0.6 m/s en las mismas temporadas. Mientras que, en la boca del Carmen la velocidad promedio del flujo fue de 0.4 m/s y de reflujos de 0.57 m/s para la temporada de nortes, y en lluvias las velocidades medias fueron de 0.4 y 0.25 m/s (flujo y reflujos, respectivamente).

De acuerdo a Geomar (2019) las magnitudes de las corrientes de reflujos en la boca del Carmen se encontraron cercanas a 0.7 y 1 m/s, mientras que en la boca de Puerto Real fueron aproximadamente de 0.7 m/s hacia la parte externa de la boca y hacia el interior de la boca entre 1 y 1.3 m/s (Figura 5.3 A). Mientras que, las magnitudes del flujo en la boca del Carmen oscilaron entre 0.7 y 0.8 m/s y en la boca de Puerto Real variaron entre 0.4 y 0.7 m/s (Figura 5.3 B).

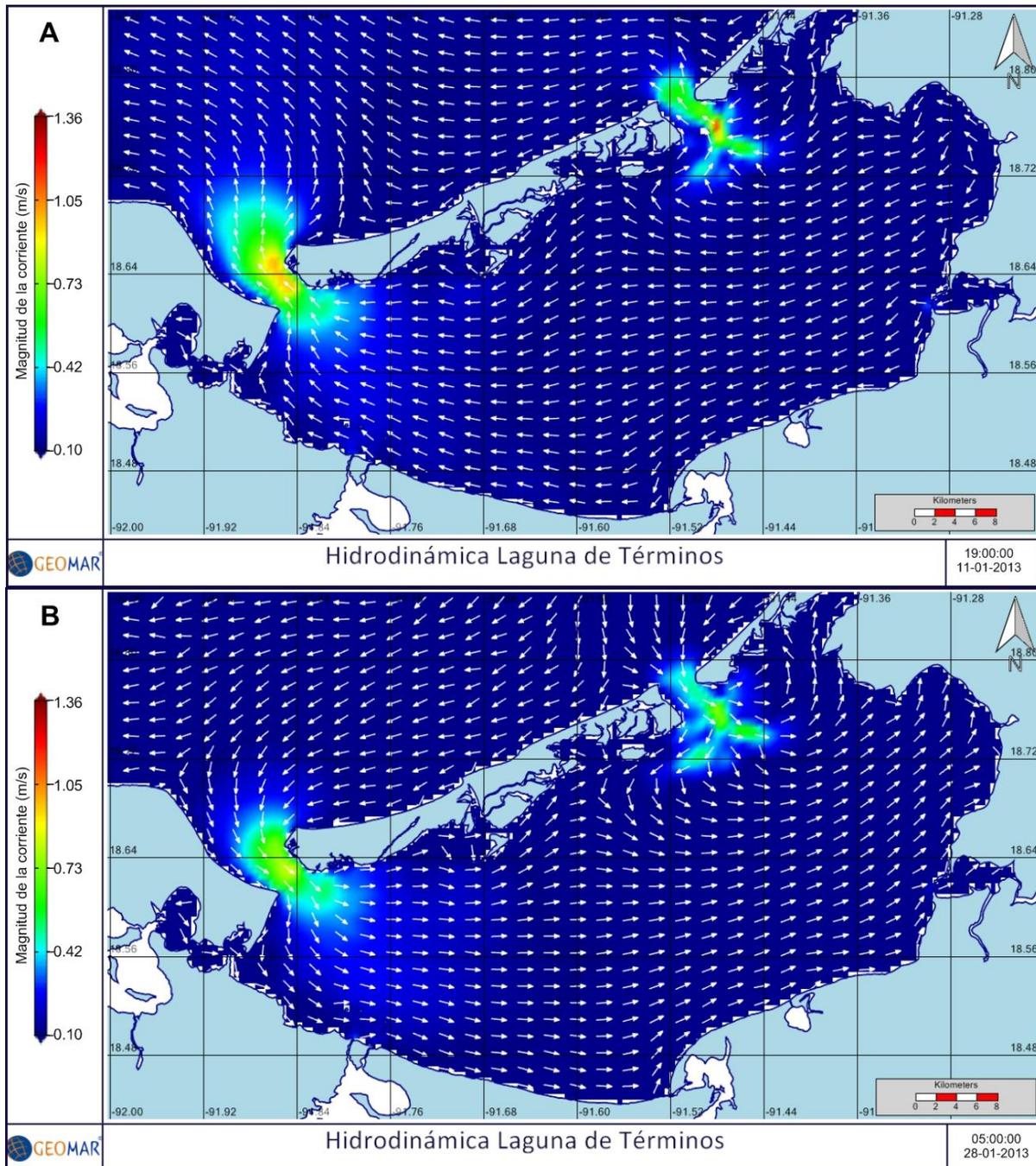


Figura 5.3. Hidrodinámica de la Laguna de Términos (Datos proporcionados por el Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos, Geomar, 2019).

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Trabajo de campo

Morfología de la zona litoral

Para llevar a cabo el análisis morfológico de la zona litoral, se realizó un levantamiento topográfico de 17 perfiles de playa ubicados en las bocas lagunares, durante abril (secas) y octubre (lluvias) de 2014 (Figura 6.1, Tabla 6.1).

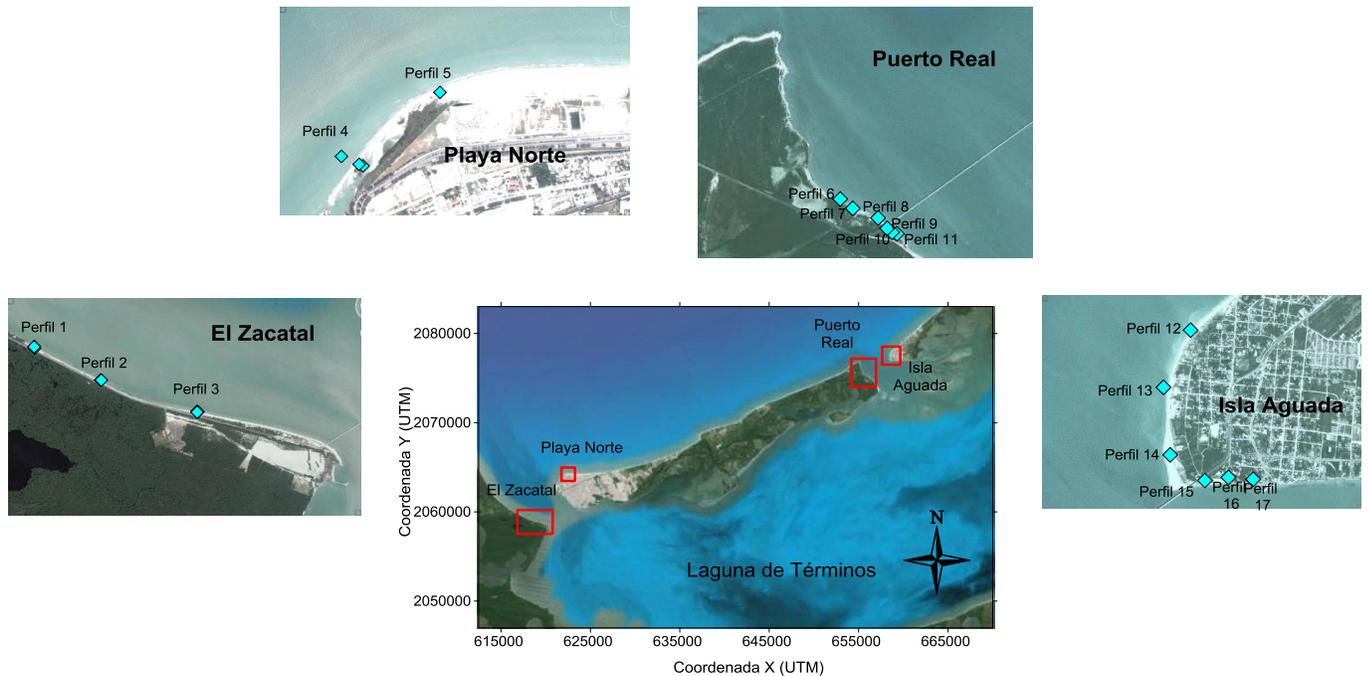


Figura 6.1 Ubicación de los perfiles de playa levantados en abril y septiembre de 2014.

El levantamiento de perfiles de playa se realizó mediante el método topográfico de nivelación diferencial simple (Márquez-García, 2002), empleando un nivel de mano, flexómetro de 30 m y estadal. Los perfiles se referenciaron con respecto al nivel de infraplaya y se orientaron perpendicularmente a la línea de costa, ubicando su posición geográfica con un navegador Garmin GPS.

Tabla 6.1. Coordenadas de los perfiles de playa en las bocas lagunares.

Sitio	Perfil	Zona	Coordenadas (UTM)	
			X	Y
El Zacatal	1	I	617264.12	2059442
		M	617261.08	2059440.5
		S	617258.17	2059437.4
	2	I	618028.41	2059057.9
		M	618022.53	2059054.8
		S	NO HUBO ZONA	
	3	I	619126.76	2058698.98
		M	619126.55	2058692.07
		S	619126.84	2058686.7
Playa Norte	4	I	621921.37	2063811.03
		M	622229.46	2064094
		S	621945.3	2063810.6
	5	I	622243.13	2064088.9
		M	621960	2063804
		S	622254.3	2064086.23
Puerto Real	6	I	655381.81	2075745.1
		M	655379.95	2075741.3
		S	655377.13	2075736.1
	7	I	655495.32	2075680.1
		M	655488.7	2075666.8
		S	655483.22	2075657
	8	I	655700.57	2075586.7
		M	655694.87	2075579.1
		S	655691.83	2075575.8
	9	I	655785.86	2075490.94
		M	655782.25	2075486.5
		S	655774.62	2075481.1
	10	I	655823.39	2075463.66
		M	655818.35	2075458.1
		S	655815.85	2075453.8
	11	I	655864.4	2075451.51
		M	655858.74	2075444.2
		S	655856.96	2075441.8
Isla Aguada	12	I	658314.68	2078468.6
		M	658339.25	2078448.4
		S	658358.94	2078438.9
	13	I	658127.7	2078026.7
		M	658147.91	2078026.3
		S	658163.33	2078025.3
	14	I	658186.72	2077530.5
		M	658201.9	2077531.9
		S	658211.4	2077536.9
	15	I	658466.95	2077335.8
		M	658461.18	2077343.4
		S	658461.89	2077351.4
	16	I	658630.05	2077357.9
		M	658630.55	2077367.2
		S	658631.54	2077374.4
	17	I	658810.43	2077349.2
		M	658810.11	2077353.9
		S	658810.29	2077360.5

Para la realización de las mediciones de cada perfil se tomaron mediciones colocando el estadal (punto visado) en los puntos donde se observaron cambios en la pendiente de la playa. Entre cada punto, se realizó una estación de medición con el nivel de mano y, con el flexómetro se midió la distancia horizontal parcial entre la estación y el estadal (Figura 6.2). Con las lecturas de la distancia vertical obtenidas con el estadal, se obtuvieron los desniveles mediante diferencias algebraicas y con la suma de las distancias horizontales parciales se obtuvo la distancia que hay entre cada punto medido.

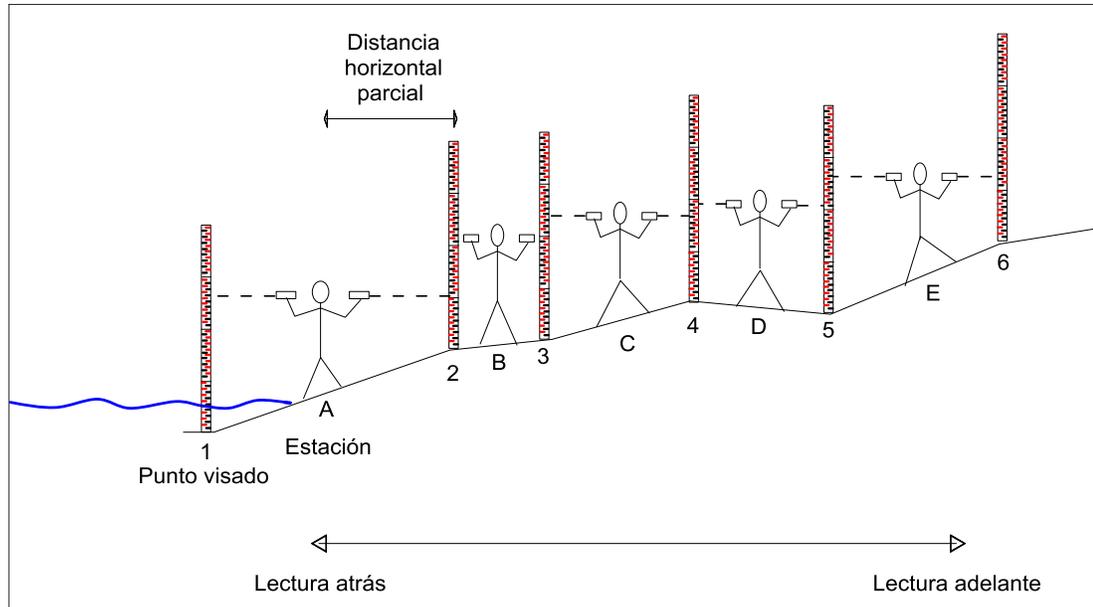


Figura 6.2. Levantamiento de perfiles de playa por nivelación diferencial simple (Modificado de Márquez-García, 2002).

La pendiente en grados de los perfiles de playa se obtuvo a partir del desnivel entre dos puntos y la distancia ellos mediante la siguiente expresión:

$$\text{Pendiente en grados } \theta^\circ = \frac{\text{Desnivel entre dos puntos (m)}}{\text{Distancia entre dos puntos (m)}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Donde

y_1 – nivel punto inicial

y_2 – nivel punto final

x_1 – distancia punto inicial

x_2 – distancia punto final

Muestreo de sedimentos de la zona litoral de las bocas lagunares

En cada uno de los perfiles de playa levantados, se colectaron muestras de sedimentos, contemplando las tres zonas de playa (Figura 6.3): infraplaya (zona comprendida entre el límite de la marea baja hasta la profundidad donde comienza el efecto del oleaje); mesoplaya (zona comprendida entre los límites de la marea baja y la marea alta) y supraplaya (zona comprendida entre los límites de la marea alta y la vegetación) y se referenciaron con un navegador GPS Garmin.

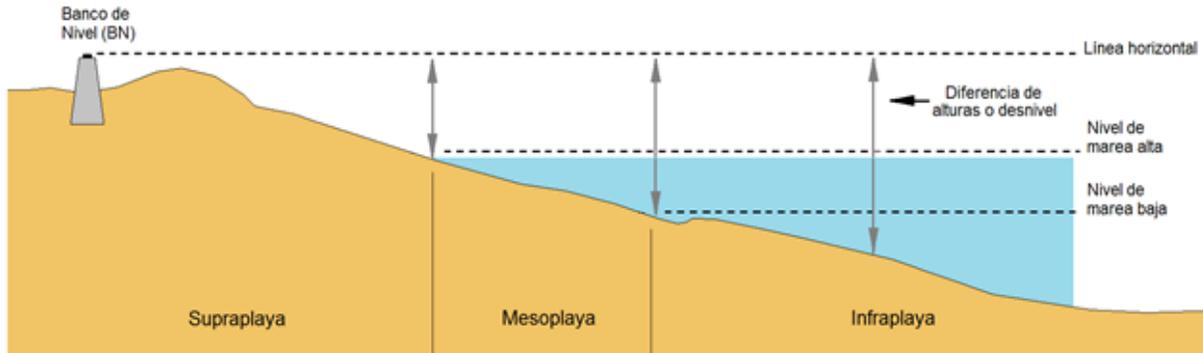


Figura 6.3 Corte esquemático de un perfil de playa (Modificado de Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994).

6.2 Trabajo de laboratorio

Análisis granulométrico

El análisis de tamaños o textura de sedimentos se realizó de acuerdo a la escala de tamaños de Wentworth (1922), utilizando los criterios propuestos por Folk (1974). En el caso de sedimentos arenosos, se realizó mediante el método de tamizado a cada 0.25 phi calculando los 4 parámetros granulométricos: tamaño gráfico promedio, desviación estándar gráfica inclusiva, asimetría gráfica inclusiva y curtosis, según Folk (1974) (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Límites de los parámetros granulométricos (Modificado de Folk, 1974).

PARÁMETRO ESTADÍSTICO	FÓRMULA/ NOMENCLATURA
Tamaño gráfico promedio	$M_z = (\rho_{16} + \rho_{50} + \rho_{84})/3$
-1 a 0 ϕ (2 a 1 mm)	Arena muy gruesa
0 a 1 ϕ (1 a 0.5 mm)	Arena gruesa
1 a 2 ϕ (0.5 a 0.25 mm)	Arena media
2 a 3 ϕ (0.25 a 0.125 mm)	Arena fina
3 a 4 ϕ (0.125 a 0.625 mm)	Arena muy fina
Desviación estándar gráfica inclusiva	$\sigma_1 = \frac{\rho_{84} - \rho_{16}}{4} + \frac{\rho_{95} - \rho_5}{6.6}$
<0.35 ϕ	Muy bien clasificado
0.35 a 0.50	Bien clasificado
0.50 a 0.71	Moderadamente bien clasificado
0.71 a 1.00	Moderadamente clasificado
1.00 a 2.00	Mal clasificado
2.00 a 4.00	Muy mal clasificado
> 4.00 ϕ	Extremadamente mal clasificado
Grado de asimetría gráfica inclusiva	$Sk_1 = \frac{\rho_{16} + \rho_{84} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{84} - \rho_{16})} + \frac{\rho_5 + \rho_{95} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{95} - \rho_5)}$
Desde 1.00 a 0.30	Muy asimétrico hacia finos
0.30 a 0.10	Asimétrico hacia finos
0.10 a -0.10	Simétricos
-0.10 a -0.30	Asimétrico hacia grueso
-0.30 a -1.00	Muy asimétrico hacia grueso
Curtosis	$K_G = \frac{\rho_{95} - \rho_5}{2.44(\rho_{75} - \rho_{25})}$
< 0.67	Muy platicúrtico
0.67 a 0.90	Platicúrtico
0.90 a 1.11	Mesocúrtico
1.11 a 1.50	Leptocúrtico
1.50 a 3.00	Muy leptocúrtico
> 3.00	Extremadamente leptocúrtico

6.3 Trabajo de gabinete

Análisis histórico de la línea de costa

Se realizó un análisis histórico con imágenes de satélite de los años 2004, 2005, 2007, 2009, 2011 y 2012 (Tabla 6.3), para determinar la variación de la línea de costa y el gradiente de erosión-acreción en las bocas lagunares. Las imágenes se georreferenciaron con el software Surfer versión 12, a partir de puntos conocidos. Una vez georreferenciadas, se realizó el procesamiento y conformación del ortomosaico (ensamble de dos o más imágenes adyacentes o con superposición), en donde se representó de forma continua cada una de las bocas lagunares (Figura 6.4). A partir de estas imágenes, se digitalizaron las líneas de costa de cada

sitio, considerando la línea intermareal de cada una de las imágenes. Una vez digitalizadas todas las líneas de costas, se definieron polígonos en donde las áreas o zonas presentaran diferencias marcadas respecto a la otra en cada periodo de análisis. Una vez definidos estos polígonos, en el software ArcGis, se realizaron los cálculos de las longitudes de cada línea de costa de cada área a analizar, así como las áreas perdidas o ganadas midiendo la diferencia de una respecto a la otra, y de un año respecto al otro (Ortiz-Pérez; *et al.* 2010). Una vez calculado el balance final, la tasa de cambio (erosión o acreción) se obtuvo dividiendo la superficie total de cada área entre la longitud de línea de costa respectiva, entre el tiempo o periodo de análisis. En el caso de los sitios El Zacatal y Playa Norte el periodo de análisis fue de 8 años, el de Puerto Real fue de 9 años para las primera cuatro áreas y para la quinta el periodo fue de 6 años. Finalmente, para Isla Aguada el tiempo fue de 5 años, debido a la calidad y disponibilidad de las imágenes utilizadas.

Tabla 6.3. Imágenes utilizadas para el análisis histórico.

Sitio	Período de análisis	Fecha de las imágenes
El Zacatal	2005-2013	6 marzo 2005,
		31 julio 2009
		20 julio 2011
		25 noviembre 2012
		22 marzo 2013
Playa Norte	2005-2013	15 septiembre 2005
		7 julio 2009
		20 julio 2011
		25 noviembre 2012
		22 marzo 2013
Puerto Real	2004-2012	10 mayo 2004
		20 mayo 2007
		20 julio 2011
		23 marzo 2012
Isla Aguada	2007-2012	20 mayo 2007
		20 julio 2011
		23 marzo 2012

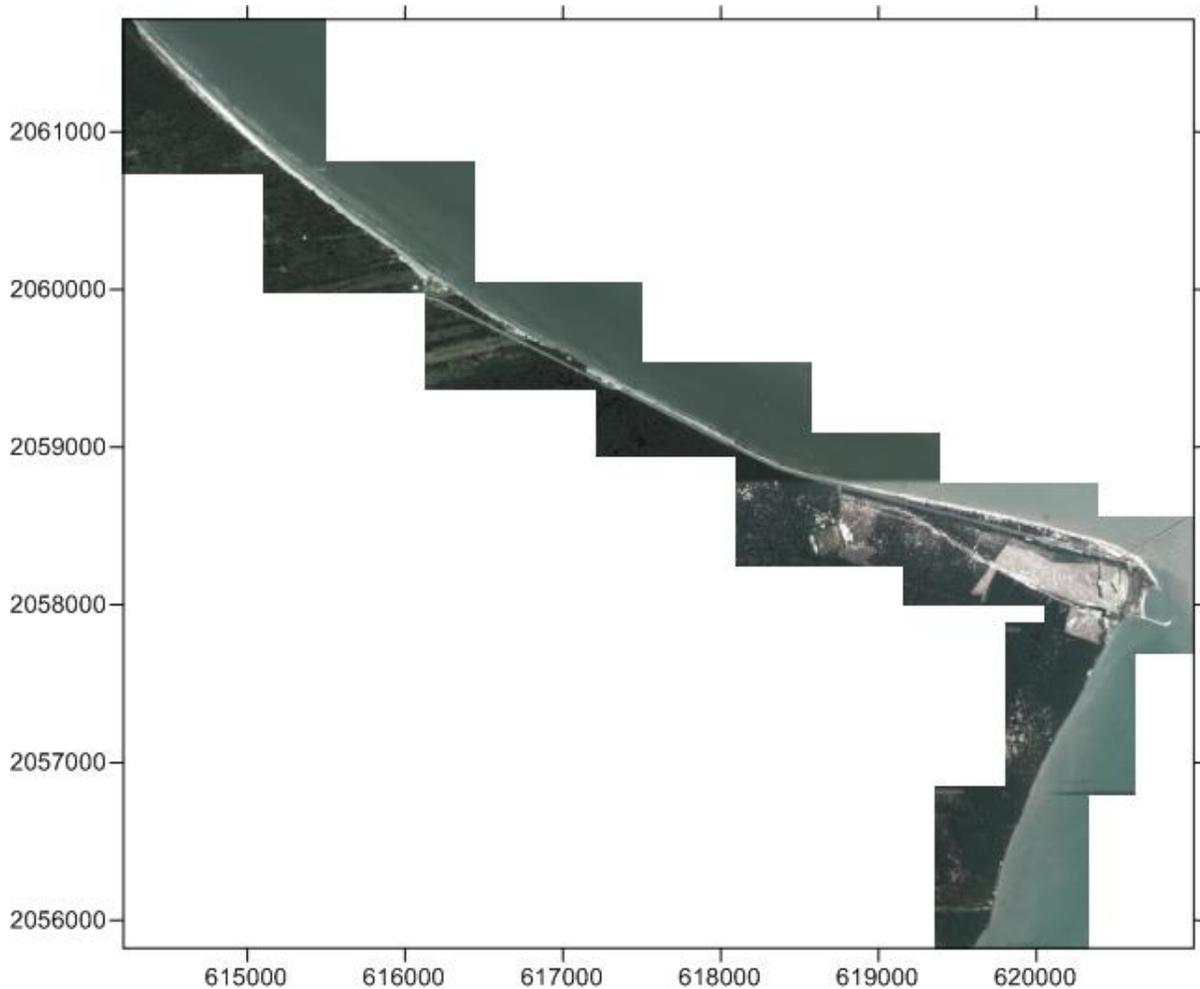


Figura 6.4. Creación del mosaico de cada una de las bocas lagunares, sitio El Zacatal.

Análisis morfológico de las bocas lagunares

A partir de los datos obtenidos de los perfiles, se construyeron gráficas de desniveles para determinar la evolución de los perfiles, ya que sirven para observar el cambio espacial de los mismos. Playas en proceso de erosión presentan cambios en su amplitud, así como, un incremento de su pendiente, la línea del primer levantamiento se ubica encima del último y se distinguen diversas configuraciones en la línea del perfil: escalones o áreas cóncavas. Mientras que, en las playas en proceso de acreción se observan cambios en los desniveles entre períodos y la línea del perfil del último levantamiento está sobre la del levantamiento anterior, además de tener igual o mayor longitud y una pendiente menor. En contraste, las playas estables conservan valores similares de pendiente, forma y longitud de playa.

Identificación de fenómenos hidrometeorológicos extremos

Los cambios morfológicos sufridos a lo largo del litoral son el resultado de la acción de diferentes agentes dinámicos actuando a diferentes escalas temporales y espaciales.

Los agentes que producen estos cambios son varios: el aporte de sedimento de los ríos, las variaciones relativas en el nivel del mar, la subsidencia, el oleaje, intercambios de sedimento en la playa emergida provocados por rebase y viento, así como, la incidencia de ciclones tropicales.

Los efectos modificadores de los huracanes tienen una dimensión temporal: ocurren en periodos de tiempo cortos (días), y pueden ocasionar cambios bruscos modificando significativamente la estructura, equilibrio y funcionamiento de los paisajes costeros, incluso de forma irreversible. En este estudio se realizó una búsqueda bibliográfica en los registros del National Hurricane Center (NHC) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de los ciclones tropicales que, debido a su trayectoria, impactaron ciudad del Carmen durante el período de 1970 y 2014, y que causaron afectaciones económicas y ambientales en la zona.

Determinación del índice de fragilidad de la zona litoral

Un ecosistema se considera frágil, cuando sus componentes ambientales pueden sufrir o sufrir una transformación o cambio (afectación) que altere los procesos abióticos, bióticos y socioeconómicos producto de las actividades de intervención antrópica del medio o debido a los procesos de desestabilización natural (susceptibilidad a fenómenos naturales) que experimenta el ambiente (Begon *et al.*, 1988; Sandía *et al.*, sin año; Toledo, 2011, INECC, 2013).

La valoración de los grados de fragilidad ambiental de un área se pueden establecer mediante dos criterios: 1) Evaluando la capacidad de respuesta que tienen los distintos componentes ambientales para admitir la incidencia de las actividades humanas sin sufrir transformaciones o cambios (por ejemplo, las zonas con fuertes pendientes en las cuales las actividades humanas aceleren el proceso natural de erosión). 2) Considerando el grado de fragilidad que pueden tener los componentes ambientales *per se*, sin la intervención humana (ejemplo, incidencia de tormentas tropicales en una zona costera).

La valoración de la fragilidad ayuda a definir medidas de mitigación o de recuperación de algún elemento del ecosistema. Sin embargo, es importante aclarar que la fragilidad es un escenario previo al efecto de algún impacto que altere su curso natural, o bien, la consecuencia en el tiempo de múltiples impactos. Para determinar lo anterior, se establece diferentes parámetros indicadores de la fragilidad. Estos parámetros, "miden" la calidad de los recursos naturales, considerando los componentes bióticos y abióticos, además del estado de los recursos para su aprovechamiento o protección y la susceptibilidad de fenómenos naturales. La calificación de la fragilidad ambiental de cada componente se realiza sobre áreas específicas que dependen del sitio a evaluar, ya que esta se relaciona con la intensidad (agresividad) del fenómeno a medir.

En este estudio, se establecieron como indicadores de la fragilidad de las bocas lagunares, la evolución de la línea de costa, la geomorfología, la granulometría y la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos en la zona (Tabla 6.4).

De acuerdo con la calidad del recurso se otorgaron valores del 1 al 3; el valor correspondiente se multiplicó por el porcentaje que ocupa el componente calificado en el sitio de estudio, y se representa desde Muy Baja; Baja; Media; Alta y Muy alta.

De acuerdo con las características de los parámetros indicadores se otorgaron valores del 1 a 3; asignando 1 cuando las características se asocien a efectos favorables o ausentes y 3, a efectos negativos o presentes (Tabla 6.4). De acuerdo con Andrade *et. al* (2004) y Toledo (2011), el valor que se obtiene para cada parámetro, se multiplica por el porcentaje de la superficie que afecta en cada sitio (El Zacatal, Playa Norte, Puerto Real e Isla Aguada), con lo que se estima el Índice de Fragilidad por sitio, según la expresión:

$$IF = \sum SiVi$$

Donde

Si= Porcentaje de superficie que ocupa ese parámetro en el sitio

Vi= Valor del parámetro.

Tabla 6.4. Valoración de los parámetros para calcular el índice de fragilidad de cada sitio.

Parámetro	1	2	3
Línea de costa	Acumulación	Acumulación-erosión	Erosión
Perfil de playa	Aumento en la elevación (comparación entre los diferentes años de medición)	Sin cambios en la elevación	Disminución de elevación (comparación entre los diferentes años de medición)
	Pendiente suave	Pendiente moderada	Pendiente pronunciada
Sedimento	Acumulativa	Estable	Erosiva
	Fino	Medio	Grueso
Incidencia de fenómenos hidrometeorológicos	Ausente	Baja	Alta
Antropogénico	Sin efecto		Con efecto

Finalmente, se obtiene la valoración de la Fragilidad Total, a través de la media (μ) y la desviación estándar (σ) obtenidas con el índice de fragilidad de cada sitio en conjunto (Toledo, 2011). Representándose desde muy baja; baja; media; alta y muy alta, de acuerdo al intervalo en el que se ubique el índice de cada sitio.

Muy Alta si $I.F.U. > (\mu + 2 \sigma)$,

Alta si $(\mu + 2 \sigma) > I.F.U. > (\mu + \sigma)$,

Media si $(\mu + \sigma) > I.F.U. > \mu$,

Baja si $\mu > I.F.U. > (\mu - \sigma)$, y

Muy Baja si $(\mu - \sigma) > I.F.U.$

Las categorías de fragilidad se generaron al comparar entre sí las unidades desde el punto de vista de su grado de morfoconservación, cuantificando las superficies afectadas por procesos actuales en cada una de ellas. Por lo anterior, la fragilidad de las unidades puede variar de un contexto morfoclimático a otro independientemente de su génesis y, en consecuencia, las categorías de fragilidad definidas en esta investigación solo son válidas para esta área de estudio (Andrade, 2010).

7. RESULTADOS

Se presentan los resultados de los análisis de la línea de costa de las bocas lagunares, de los levantamientos de perfiles de playa y colecta de sedimentos efectuados durante los meses de abril y octubre de 2014. En el caso de los sedimentos, se contó con el resultado de años anteriores para las playas de Zacatal, Playa Norte e Isla Aguada. Con estos análisis se pudieron estimar algunos gradientes de erosión y acumulación presentes en la zona de estudio, observándose sitios con una erosión muy marcada, así como sitios con procesos de acreción. Finalmente, considerando estas variables, el análisis de fragilidad ambiental permitió definir el grado de deterioro ambiental *per sé* que presentan las bocas lagunares, aumentando así la vulnerabilidad de la zona.

7.1 Evolución de la línea de costa

El Zacatal

El periodo de análisis de la línea de costa para el sitio El Zacatal comprendió los años de 2005 a 2013 (Figura 7.1). En esta playa, se encontraron cuatro zonas donde los fenómenos de erosión-acreción están presentes. La zona 1 se localizó sobre la franja costera de El Zacatal, mientras que, las zonas 2 y 3 se ubicaron en los lados poniente y oriente del puente El Zacatal y la zona 4 hacia el interior de la boca del Carmen. En el caso de las zonas 1 y 4, durante los periodos 2005-2009 y 2009-2011, el fenómeno predominante fue la erosión. En la zona 1, durante 2005-2009 el área perdida fue 20, 824.57 m², y en el periodo de 2009-2011 la pérdida fue de 11, 008.28 m² con una tasa de pérdida de 1.69 m/año. En la zona 4, el área perdida fue 13, 810 y de 10, 771.45 m² en ambos periodos y una tasa de retroceso de 2.15 m/año. En el caso de la zona 2, durante el periodo de análisis se presentaron periodos de acreción y de erosión, predominando el de acreción con un balance de 1, 972.44 m² y una tasa de avance de 0.26 m/año. También en la zona 3, el proceso dominante fue el de acreción con un balance neto de 5, 448.59 m² y una tasa de acumulación de 1.30 m/año (Tabla 7.1, Figuras 7.1 y 7.2). El balance neto para las zonas 1 y 4 fue de 28,348.15 y de 23, 688.61 m², de áreas pérdidas durante el periodo de análisis.

Tabla 7.1. Áreas de erosión y acreción de la zona costera El Zacatal, Campeche durante el periodo 2005-2013.

Año	Área (m ²)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
2005-2009	-20,824.57	5,707.80	957.23	-13,810.85
2009-2011	-11,008.28	-3,978.14	440.46	-10,771.45
2011-2012	5,260.25	-834.78	2,091.77	-1,568.90
2012-2013	-1,775.56	1,077.56	1,959.11	2,462.58
Balance Total m²	-28,348.15	1,972.44	5,448.58	-23,688.61
Longitud (m)	2,096.42	937.93	523.47	1,376.25
Tasa avance/retroceso (m/año)	-1.69	0.26	1.30	-2.15

El signo indica +:avance; -:retroceso

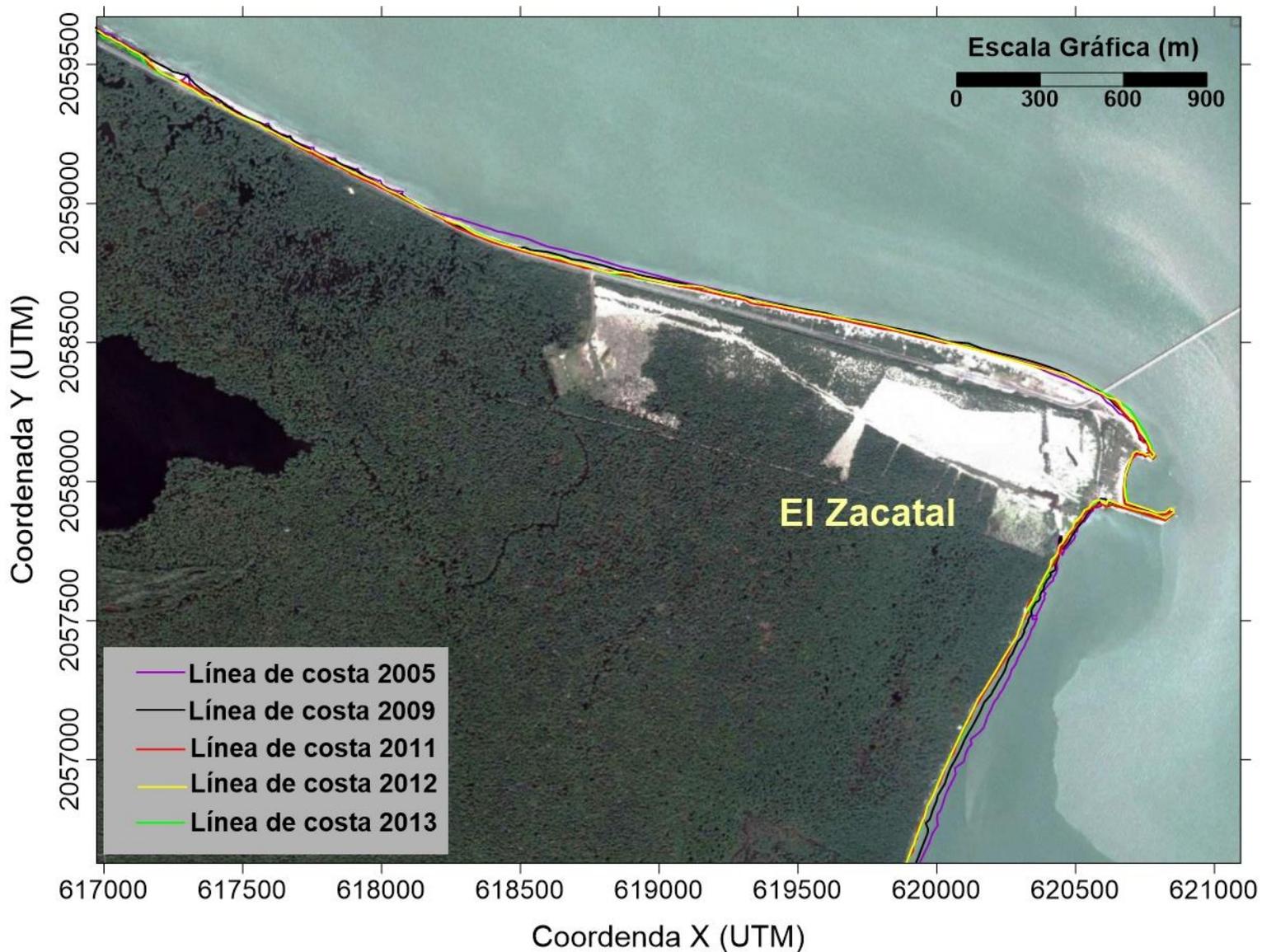
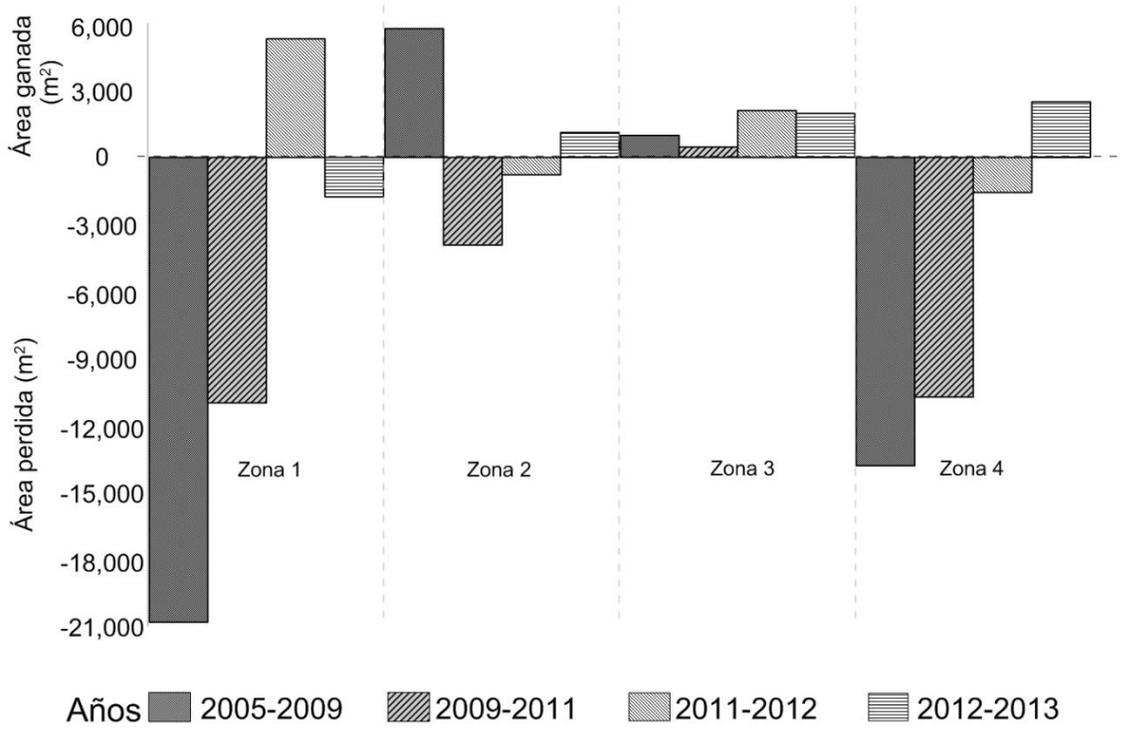


Figura 7.1. Desplazamiento de la línea de costa de El Zacatal durante el período 2005-2013.

El Zacatal



Balance total (m^2) por área

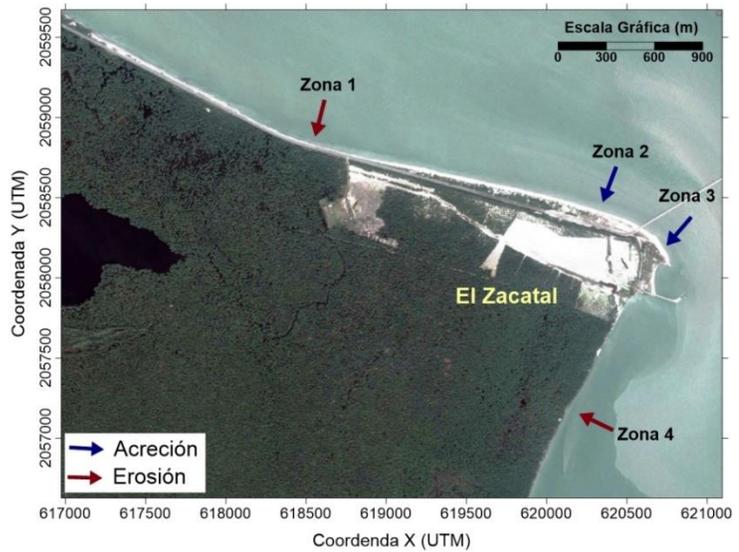
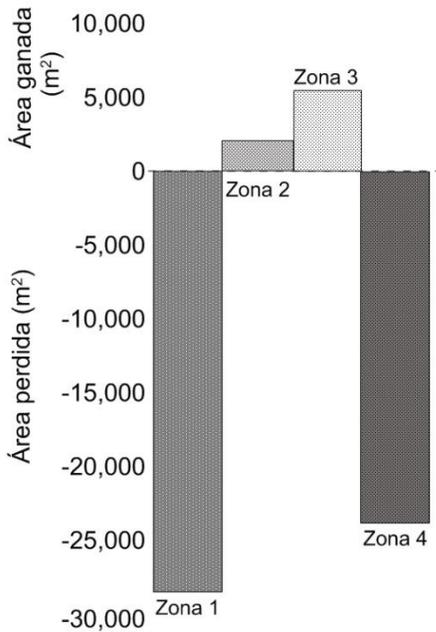


Figura 7.2. Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m^2) en El Zacatal durante el período de 2005-2013 y ubicación de las áreas analizadas.

Playa Norte

El periodo de análisis de la línea de costa para el sitio Playa Norte fue de 2005 a 2013 (Figura 7.3). En esta playa, se encontraron cuatro zonas donde los fenómenos de erosión-acreción fueron evidentes. La zona 1 se localizó sobre la franja costera de Playa Norte, mientras que, las zonas 2 y 3 se ubicaron en la lengüeta formada hacia el oeste de Playa Norte, y la zona 4 hacia el interior de la boca del Carmen. Durante el periodo de 2005-2009, las zonas 1 y 2 presentaron un incremento de su superficie de más 22, 000 m². Sin embargo, la zona 1 para los periodos de 2009-2011 y 2011-2012 se observó pérdida de superficie de más 20, 000 m² en cada lapso, dando un balance neto de 37, 369.52 m² perdidos y una tasa de erosión de 2.55 m/año, evidenciando un proceso de erosión constante (Tabla 7.2, Figuras 7.3 y 7.4). En las zonas 2, 3 y 4 los periodos de acreción-erosión han variado durante 2009-2011, 2011-2012 y 2012-2013, sin que la superficie perdida sea mayor a la ganada, en los tres casos el proceso dominante fue la acreción, con un balance neto de 33, 140.60; 9, 170.69 y 4, 671.1 m² de superficie ganada y tasas de acreción de 2.56, 0.72 y 1.40 m/año, respectivamente (Tabla 7.2, Figuras 7.3 y 7.4).

Tabla 7.2. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Playa Norte, Campeche durante el periodo 2005-2013.

Año	Área (m ²)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
2005-2009	22,400.12	22,046.6	-1,102.43	2,467.11
2009-2011	-20,771.18	9,610.53	6,936.55	-2,509.31
2011-2012	-22,656.95	-1,023.77	2,485.27	1,888.34
2012-2013	-1,6341.5	2,507.24	851.30	2,825.04
Balance Total m²	-37,369.52	33,140.60	9,170.69	4,671.17
Longitud (m)	1,833.15	1,618.21	1,596.08	417.77
Tasa avance/retroceso (m/año)	-2.55	2.56	0.72	1.40

El signo indica +:avance; -:retroceso

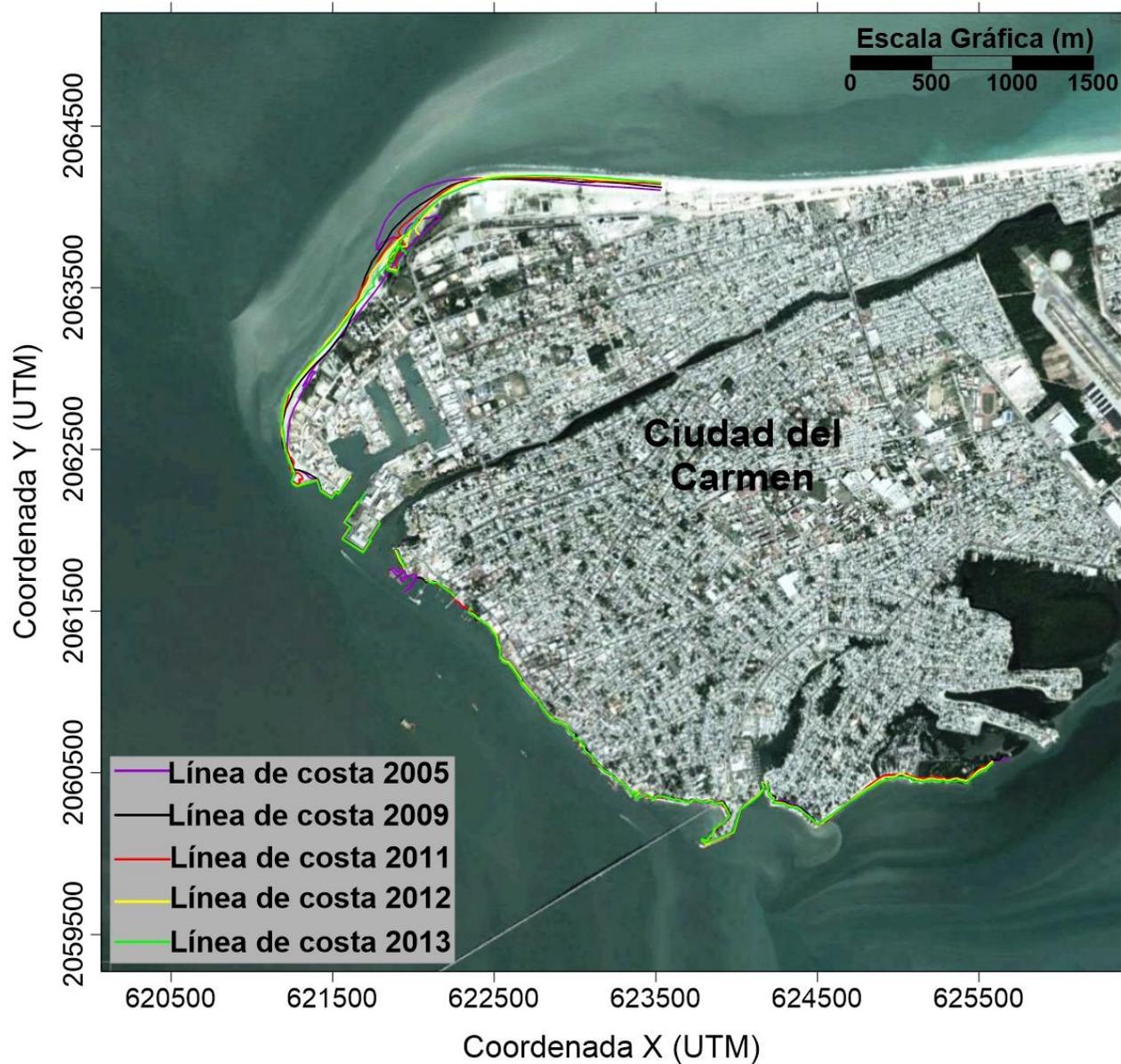
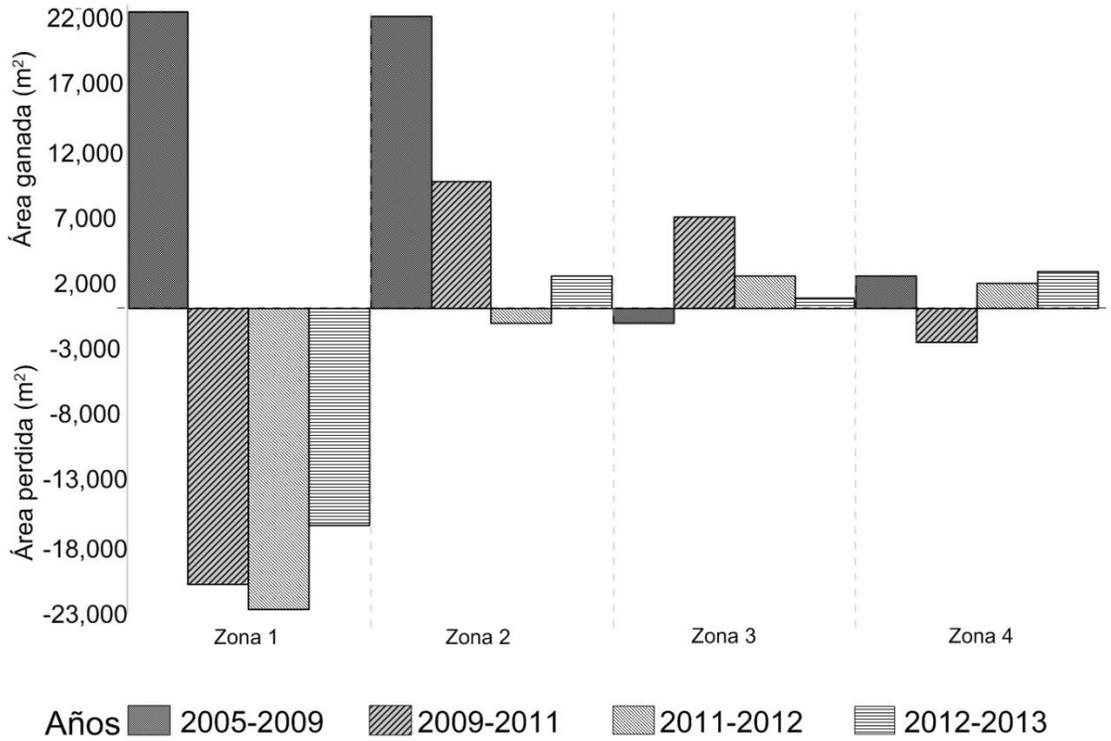


Figura 7.3. Desplazamiento de la línea de costa de Playa Norte durante el período de 2005-2013.

Playa Norte



Balance total (m²) por área

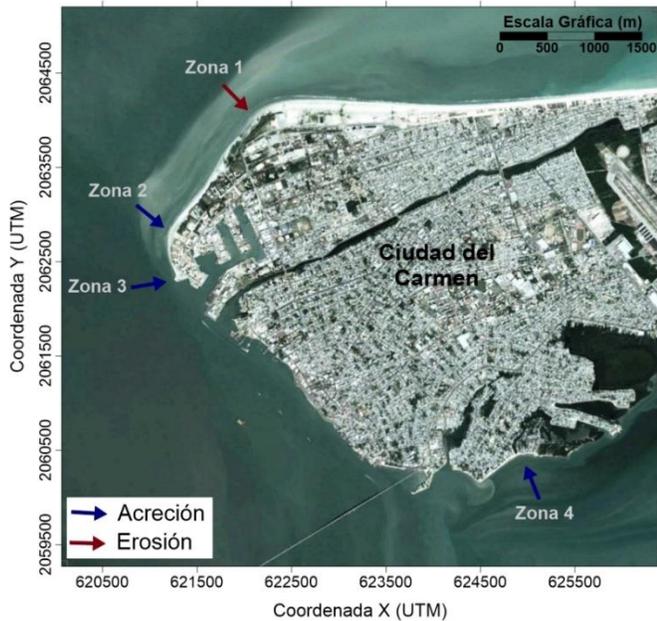
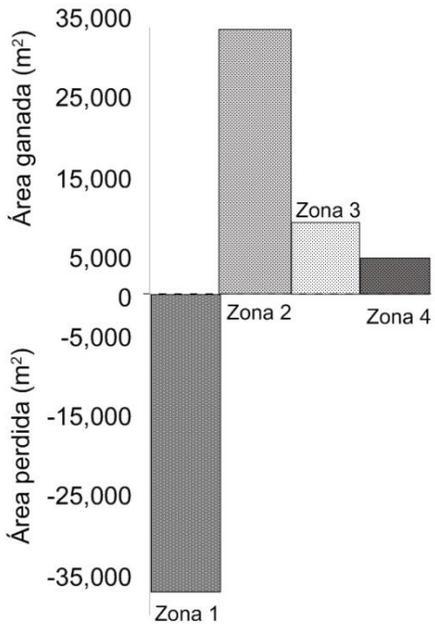


Figura 7.4 Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m²) en Playa Norte durante el período de 2005-2013 y ubicación de las áreas analizadas.

Puerto Real

El periodo de análisis de la línea de costa para el sitio Puerto Real fue de 2004 a 2013 (Figura 7.5). En esta playa, se encontraron cinco zonas donde los fenómenos de erosión-acreción fueron evidentes. La zona 1 se localizó al poniente de Punta Real, mientras que, las zonas 2 y 3 se encontraron ubicadas en Punta Real. La zona 4 al oeste del puente La Unidad y finalmente la zona 5 se localizó hacia el interior de la boca de Puerto Real. En el caso de la zona 1 durante los años 2004-2007 a 2011-2012 se presentó un incremento en la superficie de 4, 635 m², sin embargo, para el periodo de 2012-2013 la pérdida de área fue mayor respecto a lo que se había ganado (Tabla 7.3 y Figuras 7.5 y 7.6), sin embargo la tasa de erosión fue de 0.30 m/año, la más baja de todo el sitio. En el caso de la zona 2, el periodo de análisis permitió observar que los procesos de acreción-erosión son alternados, siendo las superficies de acumulación mayores (periodo 2004-2007 y 2011-2012) a las de retroceso (2007-2011 y 2012-2013), como se manifestó en el balance neto de 4, 6662.26 m² de superficie ganada y una tasa de acreción de 0.43 m/año. En el caso de la zona 3, fue evidente que el proceso dominante fue la acumulación lo que se observó en el balance final positivo de 896.68 m² y una tasa de acreción de 0.48 m/año. En el caso de las zonas 4 y 5 (en esta última, durante el periodo de 2004-2007 no fue posible realizar el análisis de línea de costa debido a que la imagen utilizada presentaba nubosidad que cubría esta zona), el proceso dominante fue el de la erosión, con un balance final de 31, 243.9 y 50, 904.8 m² de superficie perdida y tasas de erosión de 1.32 y 2.62 m/año. (Tabla 7.3 y Figuras 7.5 y 7.6), siendo la zona 5 donde se notó que el proceso de erosión se ha intensificado, ya que fue la que presentó una mayor superficie perdida y a un mayor ritmo de erosión.

Tabla 7.3. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Puerto Real, Campeche durante el periodo 2004-2013.

Año	Área (m ²)				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
2004-2007	2,227.75	1,934.27	161.73	1,110.62	0
2007-2011	653.60	-406.29	564.65	-28,454.4	-50,400.4
2011-2012	1,753.65	3,526.39	477.39	-5,056.17	926.30
2012-2013	-8,102.72	-392.12	-307.10	1,156.07	-1,430.73
Balance Total m²	-3,467.72	4,662.26	896.68	-31,243.9	-50,904.8
Longitud (m)	1,297.90	1,193.46	205.63	2,621.91	3,240.76
Tasa avance/retroceso (m)	-0.30	0.43	0.48	-1.32	-2.62

*El signo indica +:avance; -:retroceso

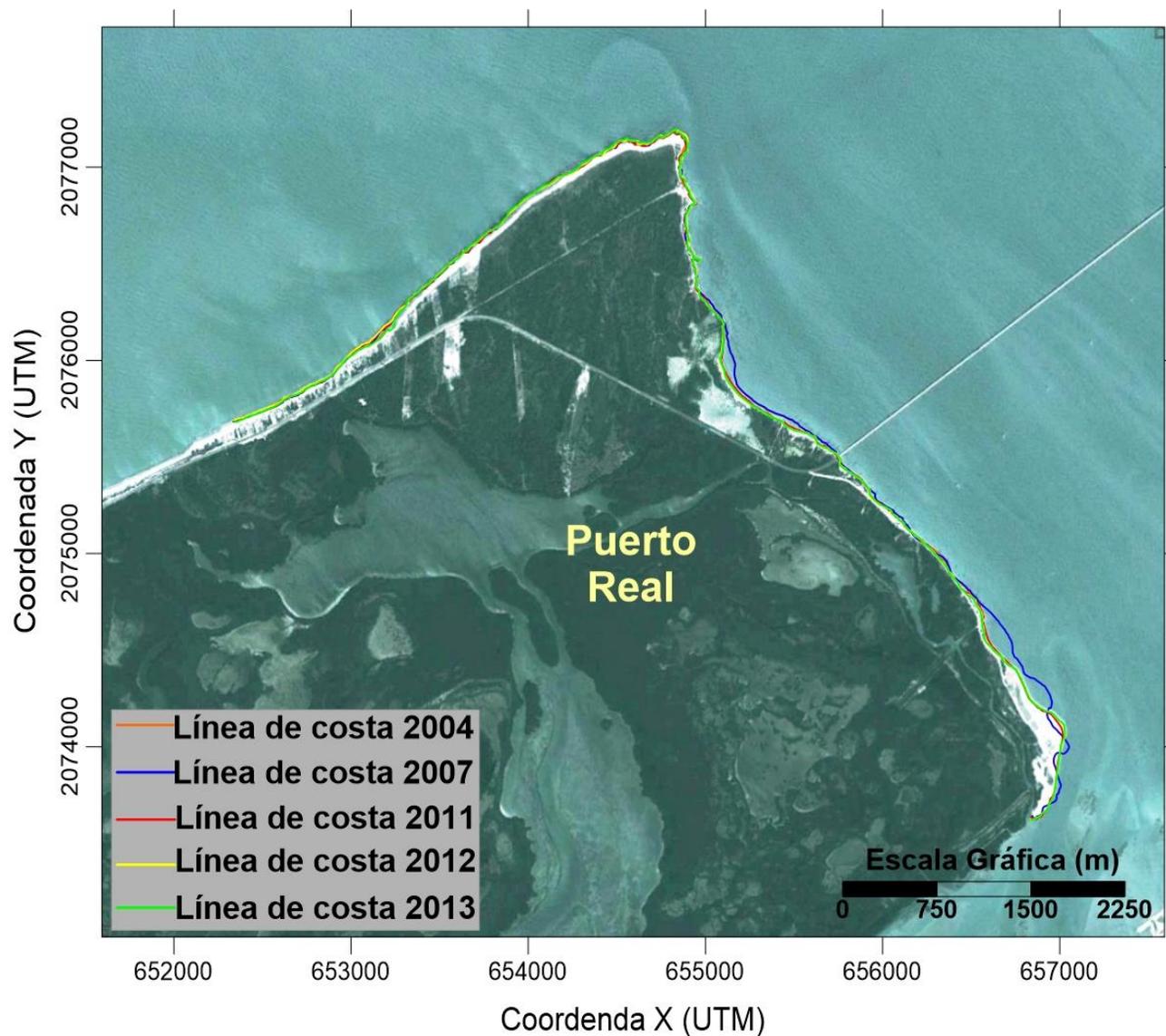
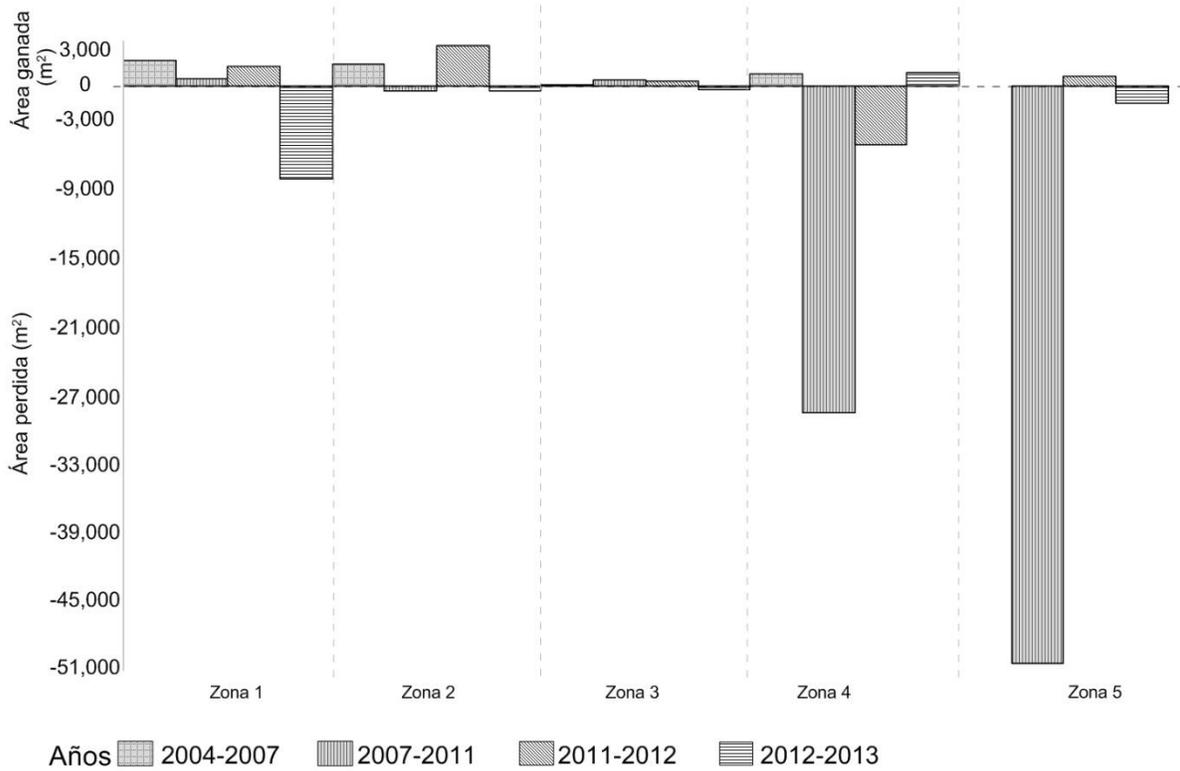


Figura 7.5. Desplazamiento de la línea de costa de Puerto Real durante el período de 2004-2013.

Puerto Real



Balance total (m²) por área

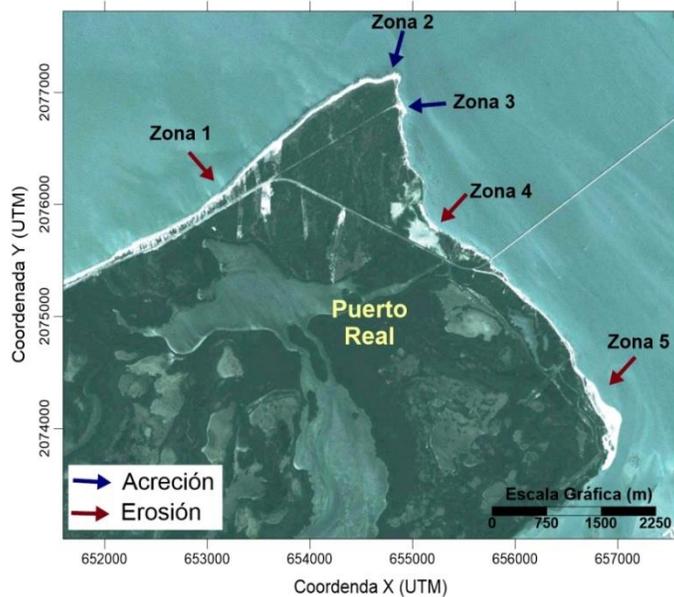
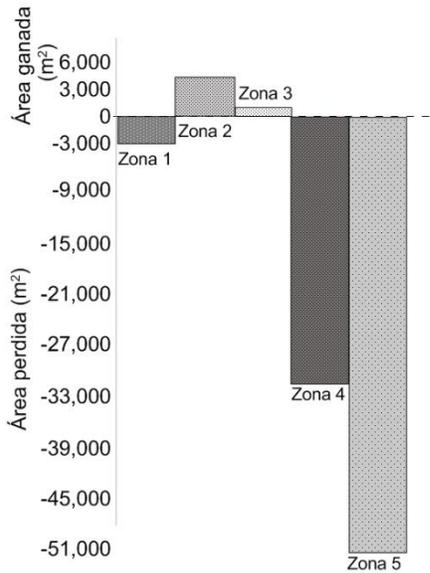


Figura 7.6 Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m²) en Puerto Real durante el período de 2004-2013 y ubicación de las áreas analizadas.

Isla Aguada

El periodo de análisis de la línea de costa para el sitio Isla Aguada fue de 2007 a 2012 (Figura 7.7), ya que las imágenes de otras fechas no contaban con la resolución además de la claridad necesarias para realizar el análisis histórico de línea de costa. En esta playa, se encontraron cinco zonas donde los fenómenos de erosión-acreción estuvieron presentes. La zona 1 se ubicó sobre la franja costera al este de Isla Aguada. La zona 2 se localizó cerca la playa conocida como Playa Dorada, mientras que, la 3 se situó al norte del puente La Unidad y la 5 hacia el interior de la laguna de Términos, al este del puerto de Isla Aguada (Figura 7.8). En la zona 1 durante el periodo de análisis, se observó que el proceso dominante fue el de acreción, con un balance neto de 22, 192.79 m² de superficie ganada y una tasa de acreción de 2 m/año, caso contrario sucede en la zona 2, donde el proceso dominante fue la erosión para el mismo tiempo de análisis, con una superficie perdida de 18, 412.5 m² y una tasa de erosión de 2 m/año. En el caso de la zona 3, durante 2007-2011 el área acumulada fue de 22, 752 m² y para 2011-2012 fue de 2, 731 m², siendo el proceso dominante el de acreción, presentando la tasa de acreción del sitio más alta de casi 4 m/año. En el caso de las zonas 4 y 5, el proceso dominante durante todo el periodo de análisis fue el de erosión, por encontrarse en sitios donde el impacto humano es notorio, las superficies de análisis son menores respecto a las zonas anteriores y las tasas de erosión fueron de 0.85 m/año y 0.4 m/año (Tabla 7.4, Figuras 7.7 y 7.8).

Tabla 7.4. Áreas de erosión y acreción de la zona costera Isla Aguada, Campeche durante el periodo 2007-2012.

Año	Área (m ²)				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
2007-2011	14,052.8	-7,665.85	22,752.19	-1,667.82	-62.93
2011-2012	8,139.99	-10,746.7	2,731.85	-294.64	-635.43
Balance Total m²	22,192.79	-18,412.5	25,484.03	-1,962.46	-698.37
Longitud (m)	2,189.79	1,779.16	1,434.73	463.81	329.56
Tasa avance/retroceso (m/año)	2.03	-2.07	3.55	-0.85	-0.42

*El signo indica +:avance; -:retroceso

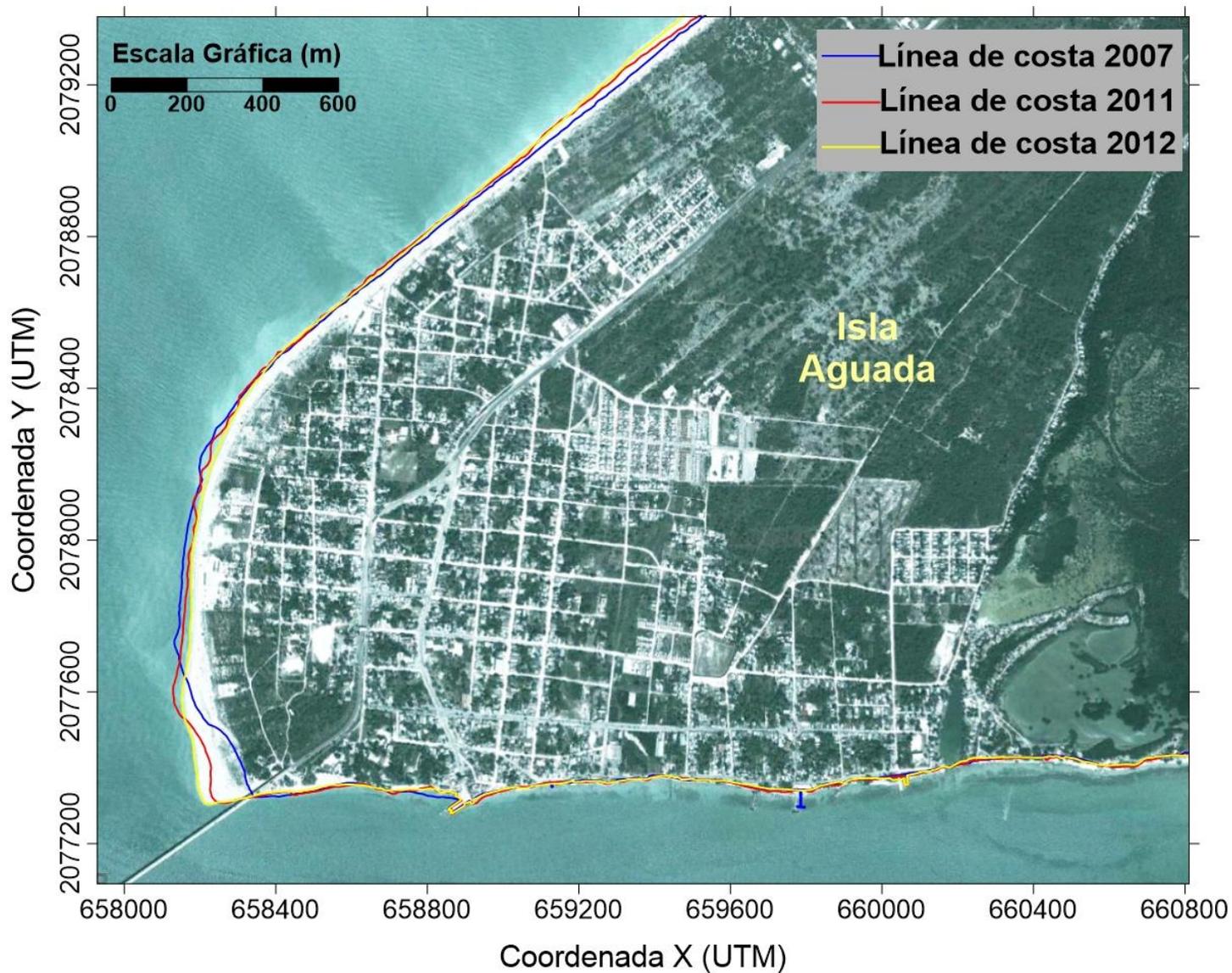
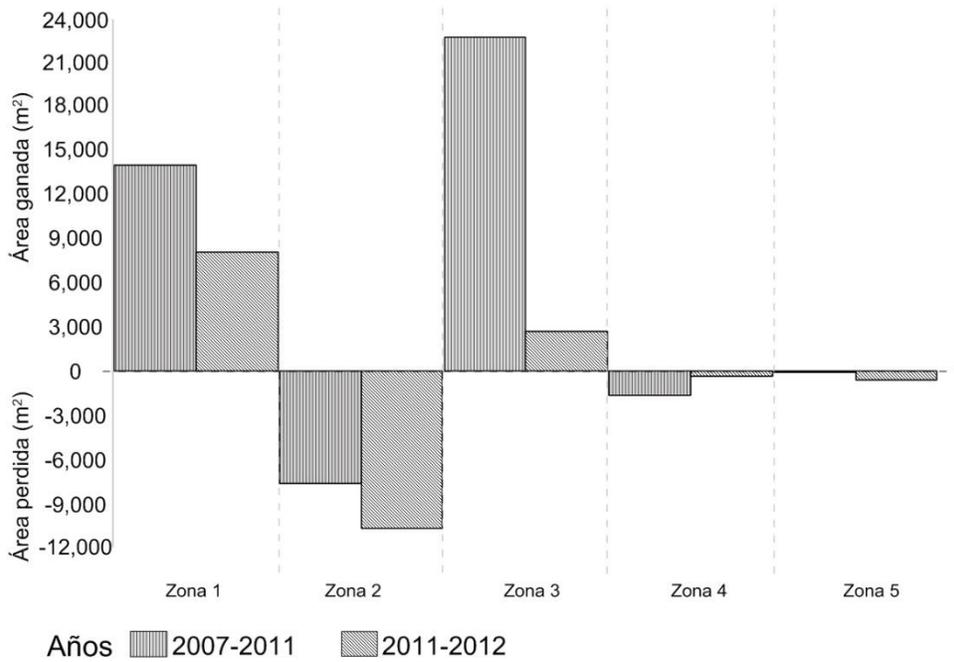


Figura 7.7. Desplazamiento de la línea de costa de Isla Aguada durante el período de 2007-2012.

Isla Aguada



Balance total (m²) por área

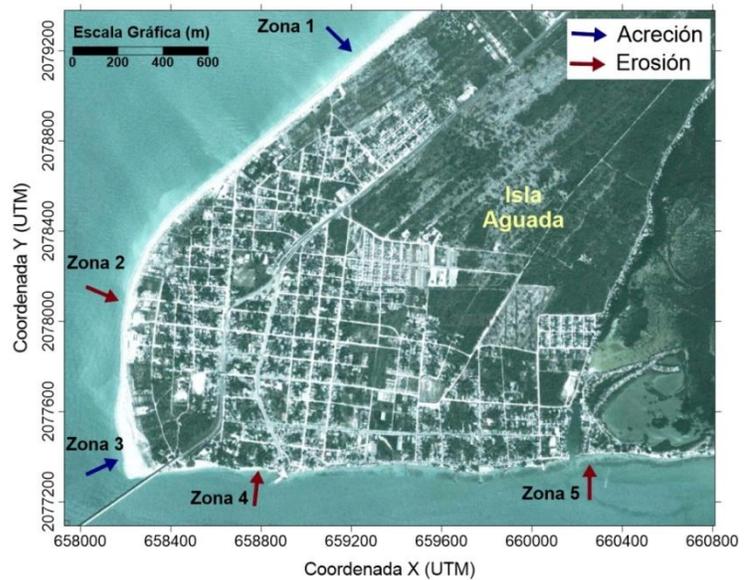
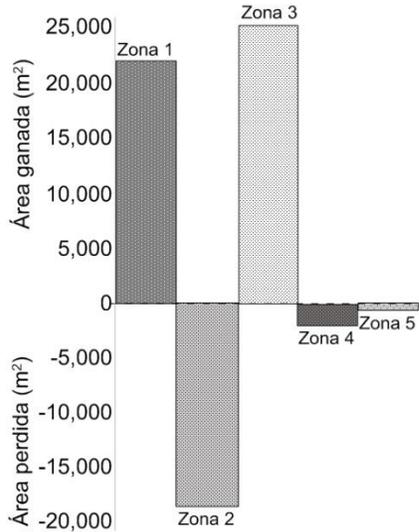


Figura 7.8. Balance entre erosión y la acreción, expresado como áreas perdidas y ganadas (m²) en Isla Aguada durante el período de 2007-2012 y ubicación de las áreas analizadas.

7.2 Análisis morfológico de las bocas lagunares

Se presentan los resultados obtenidos a partir de los perfiles de playa levantados en secas y lluvias de 2014 para El Zacatal, Playa Norte, Puerto Real e Isla Aguada.

El Zacatal (perfiles 1-3)

En el perfil 1, la pendiente de la playa es casi uniforme, presentando una forma cóncava, con una inclinación de 3° en secas y disminuyendo a 2° en lluvias lo cual está relacionado con procesos erosivos, sin presentar variación en su amplitud. El perfil 2 mantuvo una inclinación de 5° , pero tuvo una disminución en su amplitud de 2 m aproximadamente. El perfil 3 durante secas, presentó una inclinación de 4° y para lluvias fue de 6° , esto debido a un proceso erosivo, también tuvo una disminución de 6 m en su amplitud. Tanto el perfil 3 como el perfil 2 en secas presentaron una forma cóncava y para lluvias tuvieron una pendiente lineal (Figura 7.9).

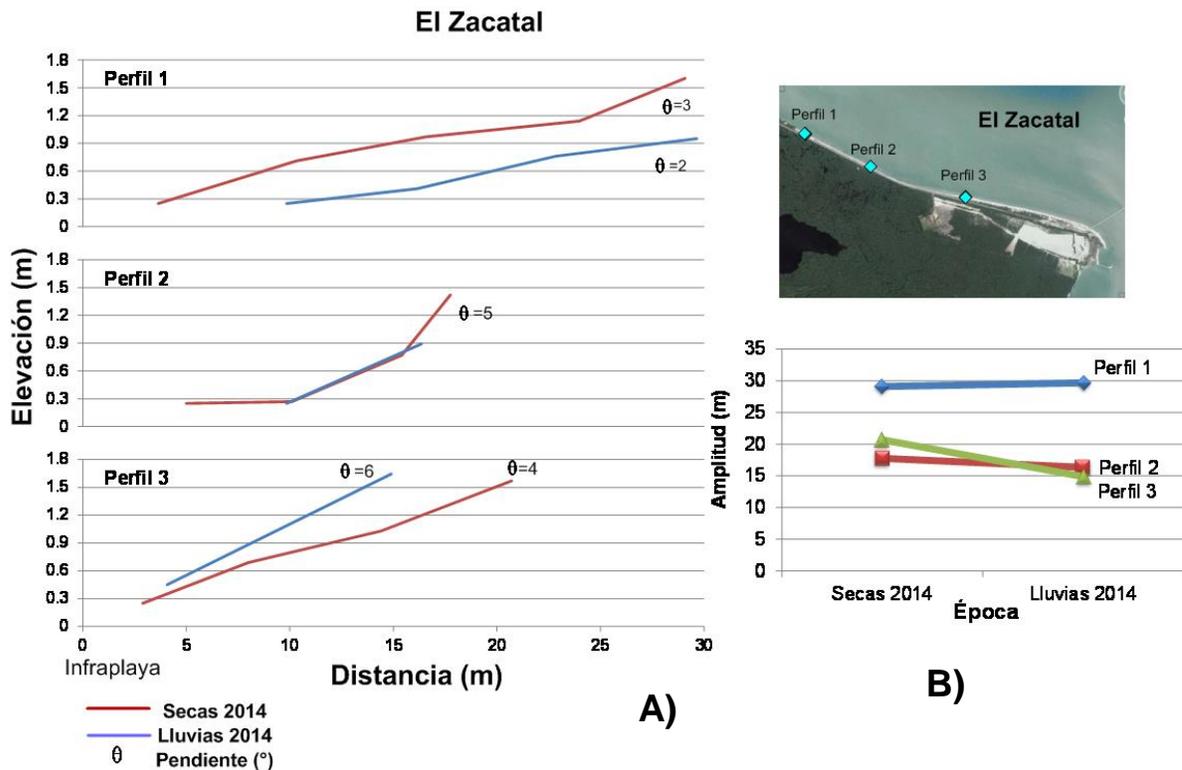


Figura 7.9. A) Diagramas de los perfiles de playa 1 al 3 levantados en El Zacatal. B) Variación del ancho de la playa.



Figura 7.10. Playa El Zacatal, se observa que los gaviones colocados para proteger el sitio, han sido derribados por efecto del oleaje presente en la zona.

Playa Norte (perfiles 4-5)

En el perfil 4, la forma de la pendiente es lineal en secas y convexa en lluvias, la anchura de la playa se mantiene casi homogénea (aproximadamente 60 m) en ambos muestreos, presentando una inclinación de 2° para lluvias. Mientras que, en el perfil 5, la pendiente fue semejante en ambos muestreos, teniendo en promedio una inclinación 4° (Figura 7.11) y manteniendo casi la misma anchura de la playa. De acuerdo a estas características, el perfil 4 puede considerarse estable con procesos acumulativos, mientras que el perfil 5, presentó ambos procesos erosión y acumulación en ciertas partes.

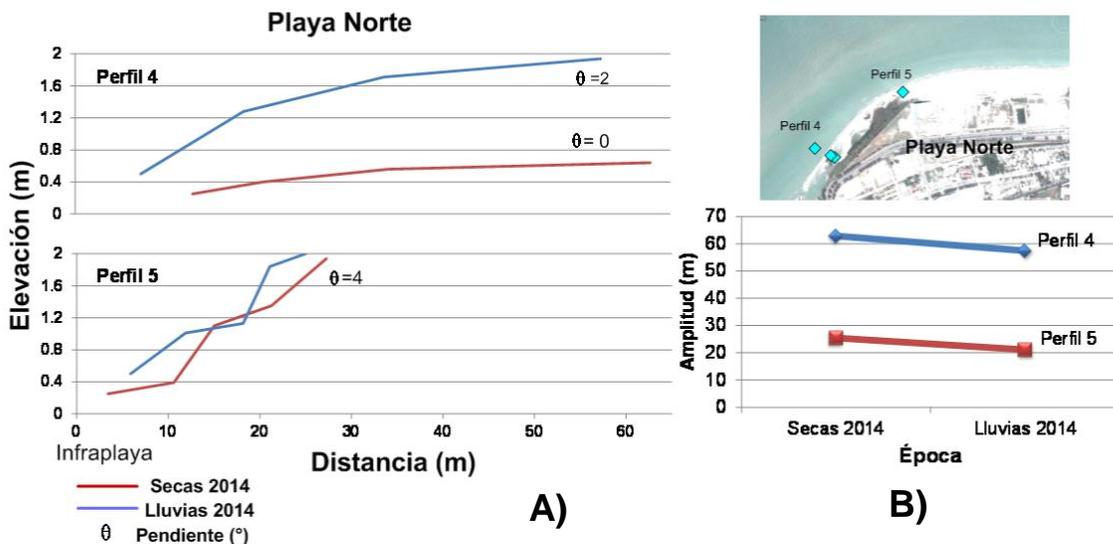


Figura 7.11. Diagrama de los perfiles de playa 4 y 5 levantados en Playa Norte. B) Variación del ancho de la playa.



Figura 7.12. Canal de marea formado en Playa Norte.

Puerto Real (perfiles 6-11)

Los perfiles 6 a 8, se encuentran ubicados del puente La Unidad hacia el lado del Golfo de México, mientras que, del 9 al 11, se encuentran del puente hacia la laguna de Términos.

El perfil 6, presenta una forma lineal durante la temporada de secas y lluvias, teniendo una inclinación de 6° en secas y aumentando a 15° para lluvias, siendo la más pronunciada en ambos muestreos en todos los sitios. El perfil presenta una disminución de su amplitud dado que en secas medía 14 m y para lluvias fue de 10 m, estas variaciones en la forma, amplitud y la pendiente pronunciada indican procesos erosivos fuertes.

En el perfil 7, las formas convexas son las observadas durante los muestreos, teniendo inclinaciones de 5° en ambas temporadas. Respecto a la amplitud, en la temporada de secas fue de aproximadamente 15 m, aumentando para lluvias a casi 28 m, considerándose como estable.

Respecto al perfil 8, la pendiente presento formas lineales y convexas, teniendo en secas una inclinación de 2° y una amplitud de 25 m, para posteriormente aumentar su inclinación a 7° , disminuyendo en su amplitud a casi 17 m para lluvias, se considera estable por sus formas (Figura 7.13).

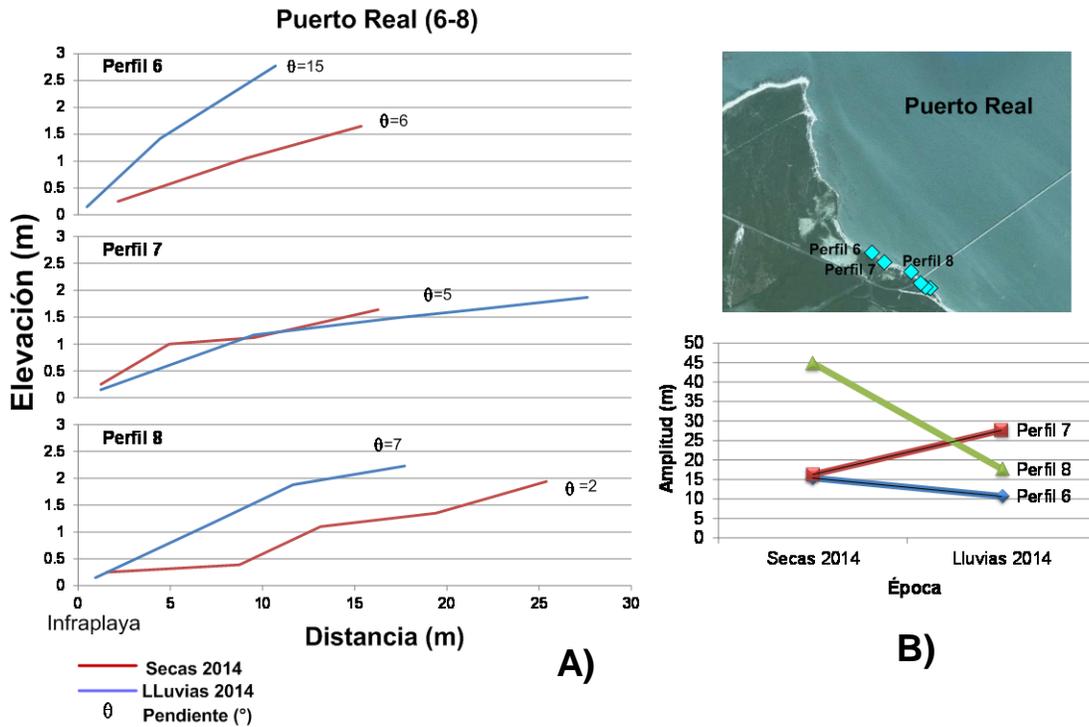


Figura 7.13. Diagrama de los perfiles de playa 6 al 9 levantados en Puerto Real. B) Variación del ancho de la playa.

La pendiente del perfil 9 presenta una forma convexa, con inclinaciones de 3° en la temporada de secas y en lluvias una inclinación de 6° . Respecto a la amplitud, éste presentó una disminución de casi 10 m. Por sus formas se considera estable, con acumulación.

En el perfil 10, la pendiente presento una forma lineal a convexa en secas y lluvias con una inclinación de 6° y su amplitud se mantuvo en ambas temporadas. Estos cambios, se asocian a procesos acumulativos.

El perfil 11 presentó una forma lineal con una inclinación de 8° y una amplitud de 15 m a 17 m en las dos temporadas, la forma de su pendiente es más inestable respecto a los otros dos perfiles que se encuentran en este lado del puente La Unidad (Figura 7.14).

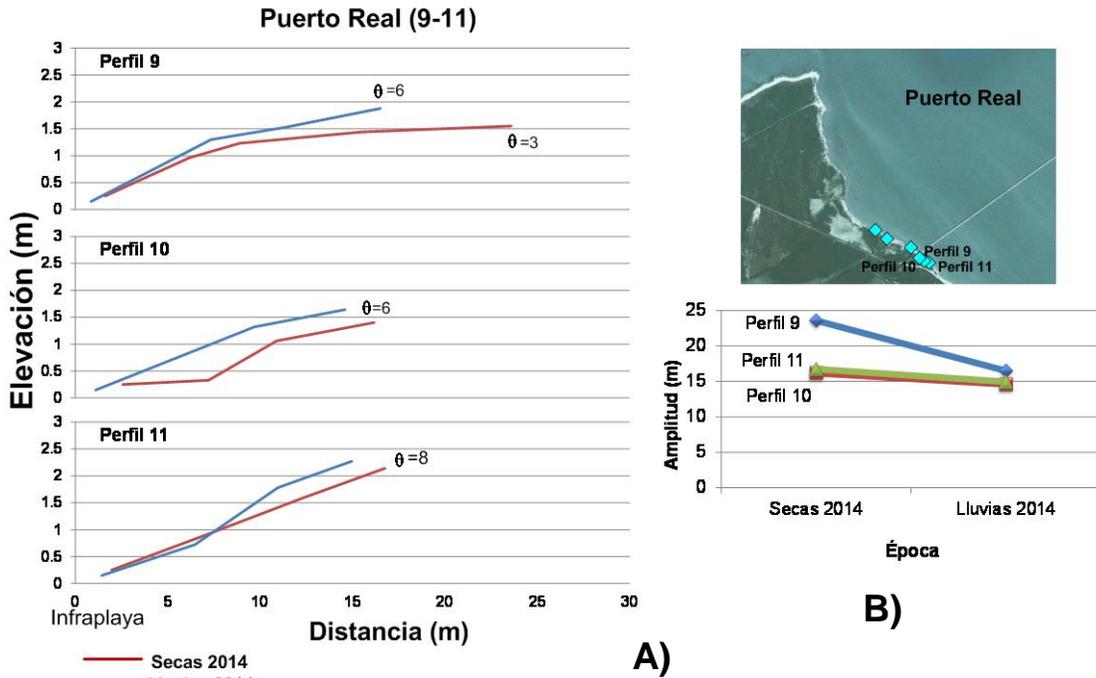


Figura 7.14. Diagrama de los perfiles de playa 10 al 11 levantados en Puerto Real. B) Variación del ancho de la playa.



Figura 7.15. Sitio Puerto Real. Manglares derribados por efecto de la erosión de la playa. Al fondo se observa como la playa ha retrocedido hasta alcanzar una casa.

Isla Aguada (perfiles 12-17)

Los perfiles 12 a 14, se encuentran ubicados del puente la Unidad del lado del Golfo de México, mientras que, del 15 al 17, se encuentran del lado de la laguna.

En el perfil 12, la forma del perfil es lineal durante secas, con una inclinación de 2° y presentando una menor amplitud de playa (casi 45 m). Mientras que, en lluvias tuvo una

inclinación de 3° con forma convexa, y presentando una mayor amplitud (53 m), puede decirse que la playa presenta procesos de acumulación y es estable.

En el perfil 13, en la temporada de secas, la forma fue convexa con una inclinación de 3°, teniendo la mayor amplitud en esta temporada (44 m), sin embargo, durante lluvias, se observó disminución en la inclinación a 2° con una forma lineal, así como en la amplitud de la playa (37 m), por lo que este perfil se puede considerar estable.

En el perfil 14, la forma de la pendiente fue convexa en secas con una inclinación de 4°, en lluvias tuvo una forma lineal con una inclinación de 2°, no presentó cambios en su amplitud, por lo que se puede considerar como estable (Figura 7.16).

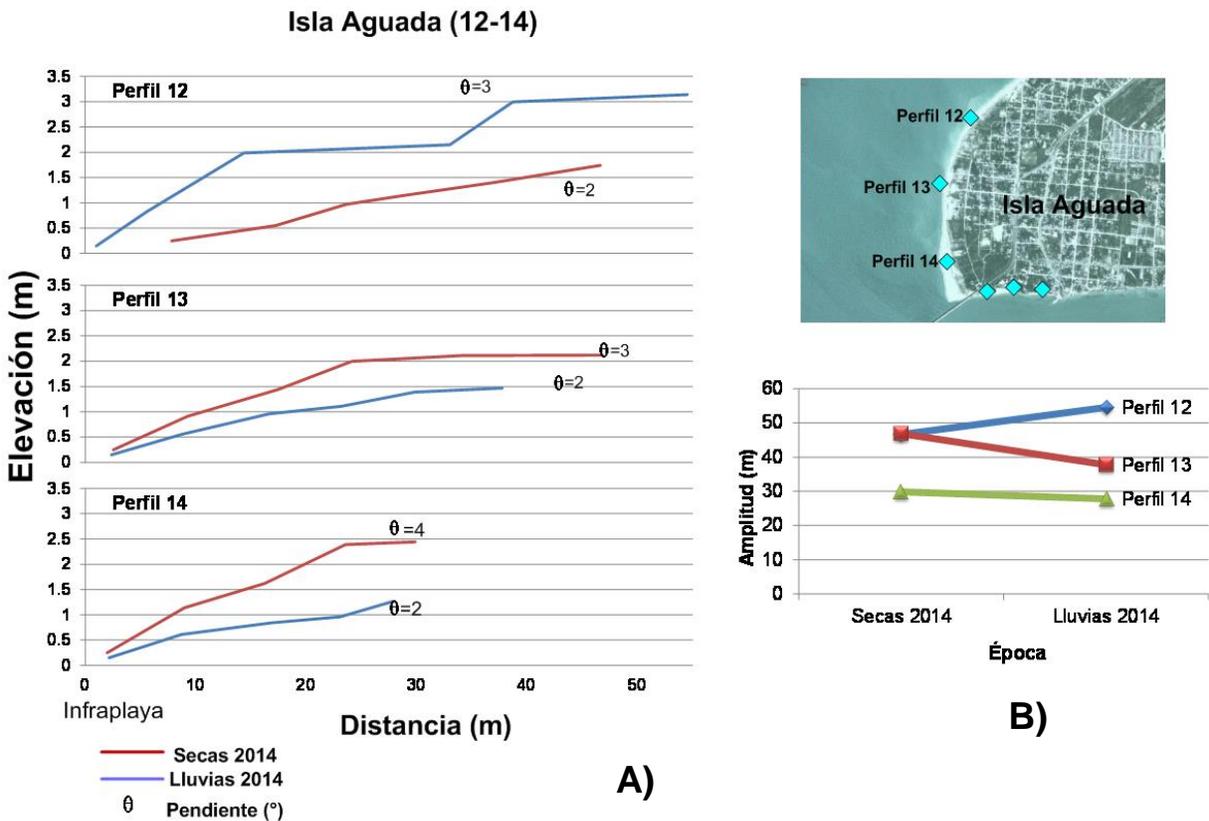


Figura 7.16. Diagrama de los perfiles de playa 12 al 14 levantados en Isla Aguada. B) Variación del ancho de la playa.



Figura 7.17. Playa de Isla Aguada, donde se observa que la amplitud y forma no presentó variaciones entre los muestreos (secas y lluvias, 2014).

Durante la temporada de secas la forma del perfil 15, fue lineal, teniendo una inclinación de 6° , mientras que, para la temporada de lluvias, su forma fue cóncava con inclinaciones de 4° , presentando casi la misma amplitud (15 m). Estos cambios en su forma se atribuyen a procesos erosivos.

Respecto al perfil 16, presentó una forma convexa durante ambas temporadas con una inclinación de 4° con amplitudes de 20 y 17 m aproximadamente en secas y lluvias respectivamente, por su poca variación se considera estable.

La pendiente del perfil 17, tuvo una forma lineal durante ambas temporadas con una inclinación de 8° con amplitudes de 10 y 8 m aproximadamente en secas y lluvias respectivamente, es el perfil más corto de todos los sitios. Al igual que el perfil 17 se considera estable por su poca variabilidad (Figura 7.18).

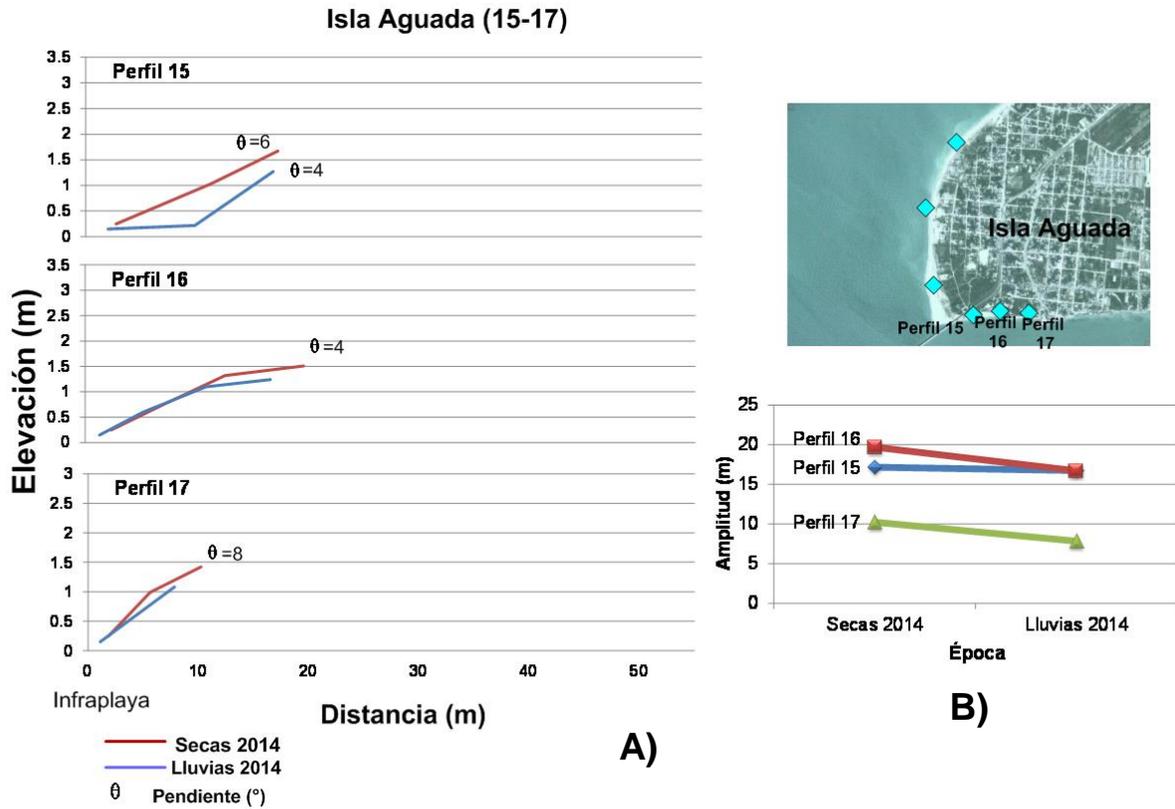


Figura 7.18. Diagrama de los perfiles de playa 15 al 17 levantados en Isla Aguada. B) Variación del ancho de la playa.

7.3 Variación de los sedimentos litorales de las bocas lagunares

Parámetros granulométricos

Los perfiles 1-3, se ubicaron en la zona de El Zacatal; los perfiles 4 y 5 en Playa Norte, mientras que, los perfiles 6-11 en Puerto Real y del 12-17 en Isla Aguada. En el perfil 1, se observó un predominio de las arenas finas en las tres zonas de playa, sin embargo, durante las temporadas de secas y lluvias del 2006, se presentaron arenas medias en la infraplaya. En el perfil 2, durante el muestreo de secas 2014 se tuvieron en la infraplaya arenas medias, mientras que, en la mesoplaya fueron arenas finas, no se tuvo zona de supraplaya debido a que durante el muestreo la zona se encontraba ocupada por gaviones, que “funcionaban” como barrera para disminuir el efecto del oleaje y proteger la zona de la erosión. En el caso de los perfiles ubicados en Playa Norte, en la infraplaya los sedimentos han variado temporalmente de arenas gruesas (perfil 4, secas 2014) a arenas medias (perfil 5, lluvias 2005, nortes 2006 y secas 2014). Mientras que, en la mesoplaya, predominaron las arenas finas sobre las medias y en la supraplaya no se observó temporalmente variación, en ambos perfiles se tuvo la presencia de arenas finas (Figura 7.19). Respecto a los perfiles ubicados del lado de la boca de Puerto Real, durante la temporada de secas 2014, en la zona de infraplaya los sedimentos variaron de

gravas (perfil 8), arenas muy gruesas (perfiles 6, 9 y 11) a arenas gruesa y medias (perfiles 7 y 10). En el caso de la mesoplaya, también hubo variación entre perfiles, de gravas (perfil 9) a arenas muy gruesas (perfiles 7 y 8), arenas gruesas (perfil 10), arenas medias (perfil 11) llegando a arenas finas (perfil 6). En el caso de la supraplaya, se observó una disminución gradual del tamaño de grano, de arenas muy gruesas (perfil 6) a arenas gruesas (perfiles 7-9 y 11) hasta arenas medias (perfil 10).

Los sedimentos encontrados del lado oriental de la boca de Puerto Real, en Isla Aguada, presentaron una variación desde gravas hasta arenas medias, pasando por arenas muy gruesas y gruesas, principalmente en las zonas de la infra y mesoplaya. En el caso de la supraplaya, las arenas variaron de arenas gruesas a medias principalmente (Figura 7.19).

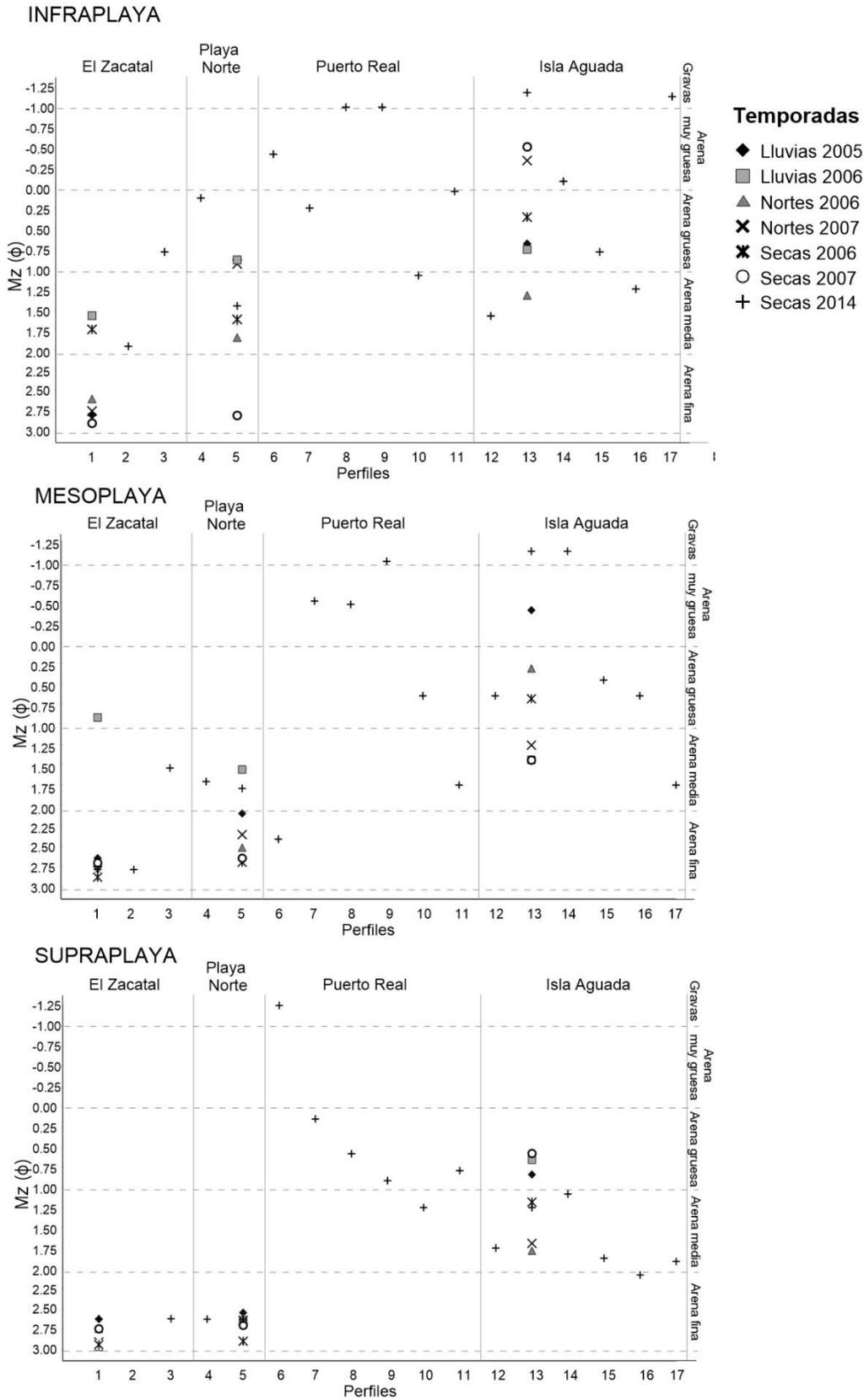


Figura 7.19. Distribución del tamaño de grano de los sedimentos en las bocas lagunares.

7.4 Síntesis de la morfología y granulometría de las bocas lagunares

De acuerdo con el análisis de línea de costa, el proceso erosivo es el dominante en el sitio El Zacatal ya que presentó una superficie perdida de 44, 615.74 m², siendo el segundo sitio después de Puerto Real con la mayor área erosionada (Tabla 7.5, Figura 7.20). En la zona 1 esto se corroboró mediante el uso de las imágenes utilizadas, porque se observó que la franja litoral ha retrocedido hasta alcanzar la carretera que conecta la parte continental con la Isla del Carmen. Además, esta zona es la que presenta la mayor superficie erosionada de las 4. Los perfiles de playa realizados en 2014 (secas y lluvias), cerca de esta zona demostraron cambios en sus pendientes y amplitudes entre una temporada y otra, aumentando la pendiente y disminuyendo la amplitud de la playa durante lluvias, evidenciando el proceso erosivo de la zona. Los sedimentos presentes en este sitio variaron de arenas gruesas a finas en las infra y mesoplaya, y en la supraplaya fueron arenas finas, predominando en las tres subzonas los sedimentos finos.

En el caso de Playa Norte, el análisis de la línea de costa reflejó que en este sitio predomina el proceso de acreción, con una superficie ganada de 9, 612.94 m² (Tabla 7.5, Figura 7.20). La zona 1 es la que presentó una mayor variación en la línea de costa, siendo el proceso erosivo el dominante, ya que se observó el cambio en la morfología de la lengüeta. En el año 2005 hacia la parte poniente se encontraba separada de la zona litoral, sin embargo para el 2009 ésta ya se había conectado a la playa formando una albufera, que entre 2011 y 2012 varió de sitio el punto por donde se conectaba al mar, rompiéndose para finales del 2012, y posteriormente en 2013 desapareció por completo (Figura 7.21). Los perfiles de playa levantados en 2014 en esta zona mostraron que la pendiente y la amplitud de la playa se mantienen homogéneas durante ambas temporadas, además se observó un canal de marea en esta área. Los sedimentos variaron de gruesos a finos en la infraplaya, mientras que, en la meso y supraplaya predominaron los sedimentos finos.

En el caso de las zonas 2 y 3, éstas se localizaron cerca del puerto pesquero, por lo que la configuración de las playas no varió mucho. En el caso de la zona 3 en el año 2011 se notó la presencia de una escollera, lo que generó acumulación de sedimento en el área, sin embargo, no puede decirse si fue de manera natural o fue rellena artificialmente, ya que se observó en las imágenes la presencia de obras cerca del puerto (Figura 7.22). No se observó algún efecto actual producido por el puente de El Zacatal, considerando que el análisis de las imágenes fue posterior a su construcción. Sin embargo, la presencia de las escolleras en el puerto pesquero de Playa Norte, podría provocar que los sedimentos transportados por las corrientes y que entran hacia la laguna, se desvíen de su cauce, evitando la depositación del material

Tabla 7.5. Balance neto del desplazamiento de línea de costa en las bocas de El Carmen y Puerto Real, Campeche durante el periodo 2004-2013.

Boca	Sitio	Balance neto Área (m ²)	Longitud (m)	Tasa avance/retroceso (m/año)	Proceso dominante
Del Carmen	El Zacatal	44, 615.74	4,934.07	-1.13	Erosión
	Playa Norte	9, 612.94	5,465.21	0.22	Acreción
Puerto Real	Puerto Real	80, 057.5	8,559.65	-1.04	Erosión
	Isla Aguada	26, 603.49	6,197.05	0.86	Acreción

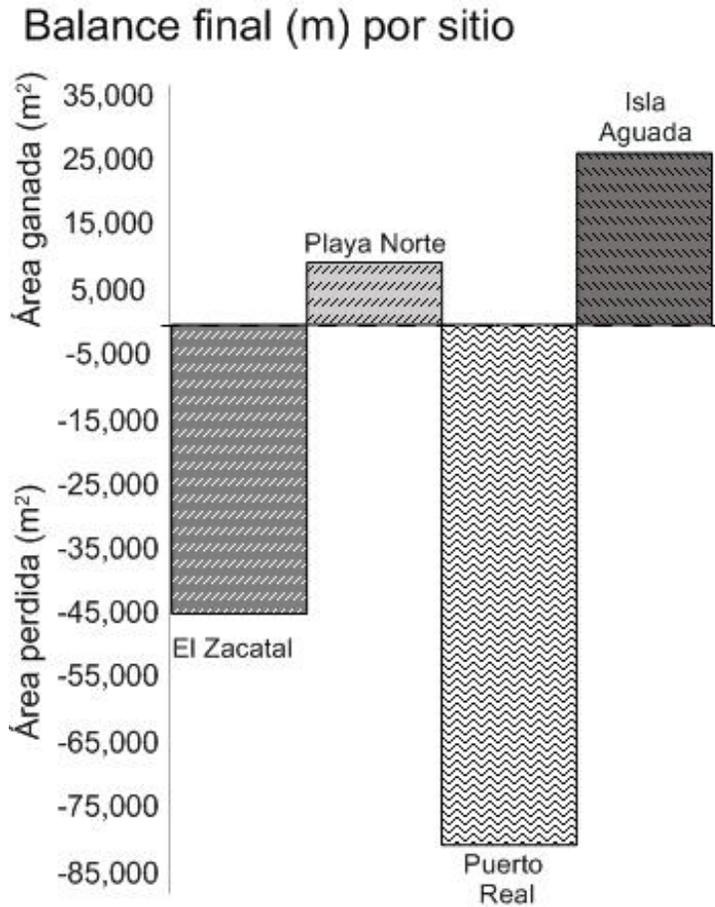


Figura 7.20. Balance neto del desplazamiento de línea de costa en El Zacatal, Playa Norte, Puerto Real e Isla Aguada, Campeche durante el periodo 2004-2013.

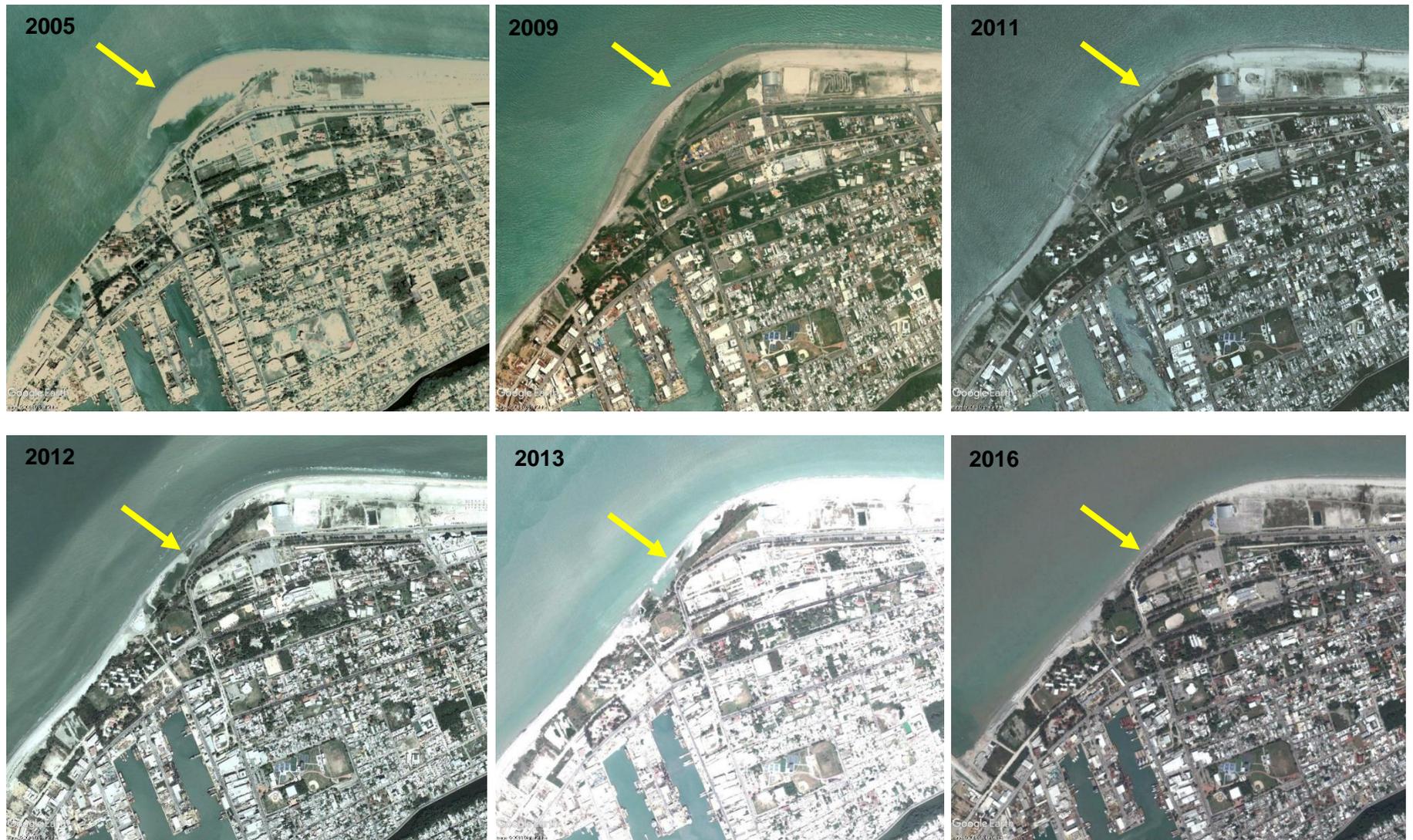


Figura 7.21. Cambios morfológicos observados en la "lengüeta" ubicada en Playa Norte, Campeche del 2005 al 2016.

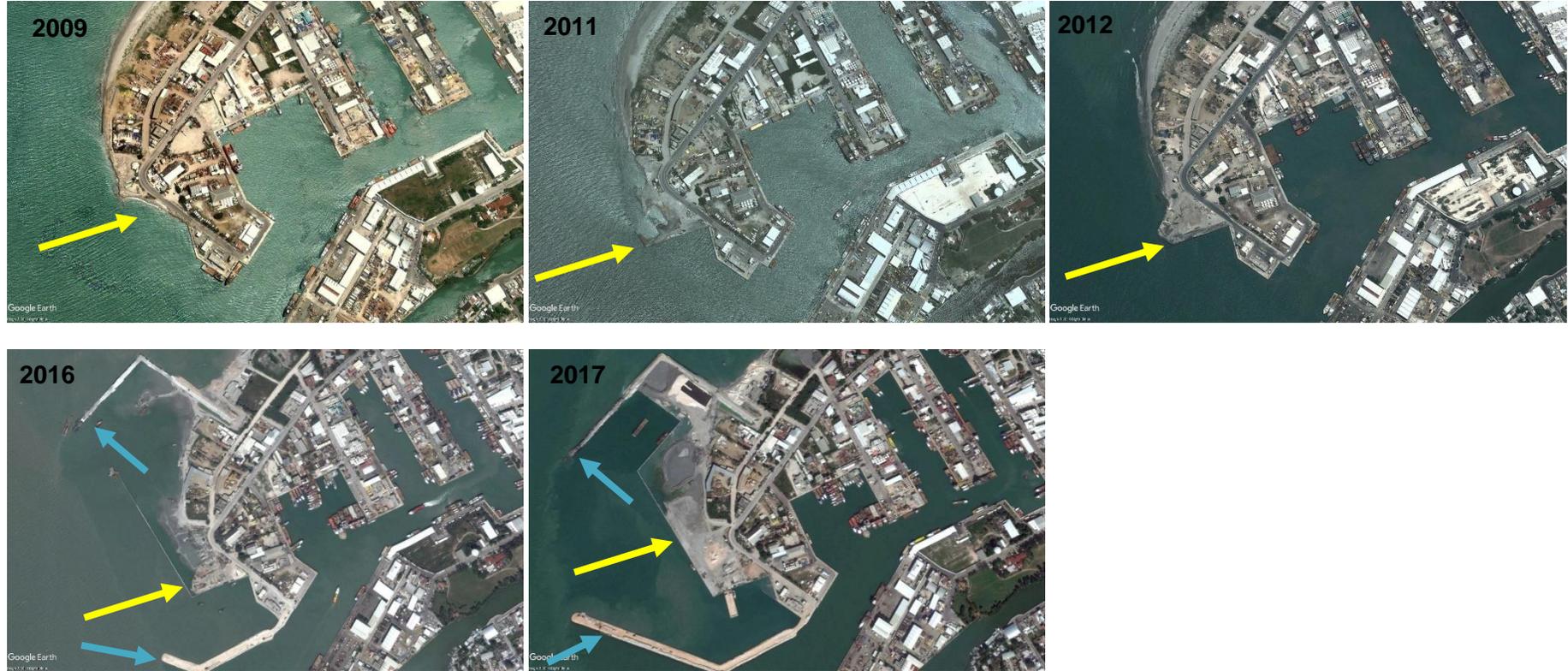


Figura 7.22. Cambios morfológicos observados cerca del puerto pesquero de Playa Norte, por la presencia de una escollera (flechas amarillas). En el 2016, las flechas azules indica la presencia de nuevas estructuras.

En el caso de Puerto Real, el análisis de línea de costa mostró que en el proceso dominante en el sitio es la erosión, con una superficie perdida de 80, 057.5 m², siendo el sitio donde se encontró la mayor superficie erosionada. Las zonas 1, 2 y 3 ubicadas cerca de la zona conocida como Punta Real variaron poco en su conformación y superficie, con tasas de erosión-acreción relativamente pequeñas respecto a las otras zonas. Esto es, debido a que estas zonas se localizaron sobre una superficie rocosa, que presenta una mayor resistencia a la erosión y protege la fracción arenosa. Mientras que, las zonas 4 y 5, ubicadas la primera al poniente del puente La Unidad y la otra hacia el interior de la laguna, mostraron que el proceso erosivo predomina sobre el acumulativo, además los perfiles de playa (perfil 6) realizados durante el 2014 (temporadas de secas y lluvias) cerca de la zona 4, mostró cambios en la pendiente así como en la amplitud de playa, aumentando la primera y disminuyendo la segunda, evidenciando el proceso erosivo. Los sedimentos presentes van de arenas muy gruesas a gruesas en las tres zonas de playa de este sitio y están compuestos principalmente de fragmentos de conchas y algunos fragmentos rocosos.

En relación a Isla Aguada, el proceso dominante fue el de acreción con una superficie de 26, 603.49 m². El análisis por zonas mostró que la zona 3, ubicada al norte del puente La Unidad, es la que presentó mayor superficie ganada, durante el periodo de análisis, por lo que el proceso acumulativo es el dominante, con la tasa de acreción más alta de todos los sitios (3.55 m/año). Además, los perfiles de playa realizados durante 2014, mostraron que esta zona presenta poca variación en cuanto a la pendiente y cambio de la amplitud de las playas. En este sitio los sedimentos presentes varían en su tamaño, desde arenas muy gruesas principalmente en la infra y mesoplaya hasta arenas medias en la supraplaya, están compuestos principalmente de fragmentos de conchas. Respecto a las zonas 4 y 5 (que presentan las superficies más pequeñas de las 5), se situaron dentro de la zona oriente de la boca de Puerto Real, en un sitio donde los asentamientos humanos se han establecido en la zona de playa, propiciando la modificación de la dinámica litoral del lugar, siendo los procesos erosivos dominantes.

Los materiales biogénicos encontrados en Puerto Real como en Isla Aguada, son transportados de la plataforma continental hacia la boca de Puerto Real por la corriente litoral proveniente del noreste. Mientras que, el material rocoso proviene de los afloramientos rocosos que se encuentran en la punta de Puerto Real. No se observó algún efecto actual producido por el puente La Unidad hacia el lado de Puerto Real, sin embargo, en Isla Aguada (zona 3), el efecto observado es de una barrera, que permite una fluctuación de los sedimentos hacia un lado o a

otro, entre temporadas, manteniendo a esta zona con acumulación, éstos sedimentos no llegan a la zona 4, donde existe un procesos erosivo.

7.5 Identificación de fenómenos hidrometeorológicos extremos

Una de las principales amenazas naturales en la zona litoral, que destaca por su potencial destructivo y su cobertura de afectación, son los ciclones tropicales, ya que estos fenómenos meteorológicos se acompañan de fuertes vientos, lluvias torrenciales, deslizamientos de tierra e inundaciones. Más del 70% del litoral está expuesto en mayor o menor grado a estos fenómenos, por lo que el potencial económico, así como los asentamientos urbanos se ven frecuentemente amenazados.

De acuerdo a los registros del National Hurricane Center (NHC) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), durante el período de 1892 al 2014 se han presentado 27 fenómenos hidrometeorológicos que han impactado directamente o han pasado muy cerca del estado de Campeche, ciudad del Carmen y sus proximidades (Tabla 7.6 y Figura 7.23). Uno de los mayores huracanes que han impacto fue el ciclón tropical Dean en 2007 que alcanzó la categoría de Huracán 5, con vientos mayores a los 270 km/h, siendo el noveno huracán con la presión más baja registrada de tormentas en el Atlántico desde 1851 al 2018. En 1995 se presentó el huracán Roxanne de categoría 3 y vientos máximos de 185 km/h. Mientras que, en el 2012, se presentó la tormenta tropical Ernesto, con vientos máximos de 157km/h y en el año de 1973, huracán categoría 1 Brenda con vientos de 148 km/h. Todos estos ciclones han causado graves daños a la infraestructura y al litoral de Campeche, sin embargo no existen reportes o estudios que evidencien el impacto directo de estos meteoros en los sitios evaluados en esta tesis.

Tabla 7.6. Ciclones tropicales (CT) que impactaron en Campeche y sus proximidades de 1892-2014.

Año	Fecha	Nombre	Categoría	Vientos máximos (km/h)	Presión mínima (mba)	Lugar(es) de entrada en tierra	Día (s) impacto	Categoría de impacto en tierra	Vientos al tocar tierra (km/h)
2014	21-29 oct	Hanna	DT	65	1000	12 km al Norte de Sabancuy, Campeche	22-oct	DT	37
2013	16-21 jun	Barry	TT	74	1003	Playa La Mancha, Ver.	20-jun	DT	56
2012	1-10 ago	Ernesto	H2	157	973	Norte de Isla Aguada, Campeche	09-ago	TT	111
	9-19 ago	Helene	DT	74	1004	Población de Horconcitos, Norte de Veracruz	16-ago	DT	46
2010	24 jun-2 jul	Alex	H2	176	946	Cercanías de los poblados de Chicbul y San Isidro, a 75 km al Sur-Suroeste de Champotón, Camp	27-jun	DT	65
	19-26 oct	Richard	H2	157	977	155 km al Este-Sureste de Cd del Carmen, Camp.	26-oct	DT	46
2008	6-7 oct	Marco	TT	102	998	30 km al Este de Misantla, Ver.	07-oct	TT	46
2007	13-23 ago	Dean	H5	278	905	60 km al Oeste de Champotón, Campeche.	21-ago	H1	139
1998	22 oct-9 nov	Mitch	H5	287	905	70 km al Noreste de la ciudad de Campeche, Camp	03-nov	DT	56
1996	19-25 ago	Dolly	H1	130	989	Localidad Villa Madero, Campeche	21-ago	DT	56
1995	7-21 oct	Roxanne	H3	185	956	Localidad Villa Madero, Campeche	12-oct	H1	130
1993	14-21 sep	Gert	H2	157	970	Norte de la localidad Maya Tecún II, Campeche	18-sep	DT	56
1980	20-26 sep	Hermine	TT	111	993	Este de Sabancuy, Campeche	23-sep	TT	93
1973	18-22 ago	Brenda	H1	148	977	Localidad San Antonio Cárdenas, Campeche	21-ago	H1	111
1958	14-22 sep	Gerda	TT	93	1001	Este de Atasta, Campeche	17-sep	DT	46
1955	21-30 sep	Janet	H5	278	914	Cerca de Tuxpan, Ver.	28-sep	H3	194
1954	24-30 sep	Gilda	TT	111	998	Cerca de Sabancuy, Campeche	28-sep	DT	56
1949	27 sep-7 oct	Sin nombre	H2	176	965	Cerca de la Localidad La Palma, Campeche	01-oct	DT	56
1942	3-5 ago	Sin nombre	TT	93	1002	Cerca de Atasta, Campeche	04-ago	DT	56
1933	14-19 may	Sin nombre	TT	83	1001	Cerca de Isla del Carmen	19-may	TT	65
	14-27 jul	Sin nombre	TT	83	1002	Cerca de Isla del Carmen	19-jul	DT	46
1932	7-18 oct	Sin nombre	TT	111	SR	Este de La Lagartera, Campeche	13-oct	DT	56
1931	10-19 ago	Sin nombre	TT	93	SR	Cerca de Puerto Rico, Campeche	17-ago	TT	65
	6-13 sep	Sin nombre	H4	213	SR	Cerca de Sabancuy, Campeche	11-sep	TT	93
1924	18-21 jun	Sin nombre	TT	74	SR	Este de Ciudad del Carmen	19-jun	TT	65
1893	4-7 jul	Sin nombre	H2	157	SR	Cerca de Isla Aguada	07-jul	TT	74
1892	5-16 oct	Sin nombre	H2	157	SR	Laguna de Términos	13-oct	TT	102

Nota: DT: Depresión Tropical; TT: Tormenta tropical; H1: Huracán categoría 1; H2: Huracán categoría 2; H3: Huracán categoría 3. H4: Huracán categoría 4. H5: Huracán categoría 5. SR: Sin Registro. Los datos fueron tomados de Office for Coastal Management Digital Coast-NOAA, Servicio Meteorológico Nacional-CONAGUA y del Meteorológico Pemex Exploración y Producción. Los marcados en negritas presentaron vientos mayores a los 110 km/h al tocar tierra.

Se debe tener en cuenta que durante un huracán se genera un oleaje de tormenta y sobreelevación de tormenta cuando fuertes vientos soplan hacia las playas apilando agua hacia la costa produciendo una excepcional elevación del mar en unas horas o días. Acompañando esta elevación del mar, se tienen grandes olas que rompen hasta la supraplaya, inundación de las partes bajas de las áreas costeras y cambios en la morfología de la costa en poco tiempo.

La erosión de las playas es muy severa cuando existen estos eventos y se forma la sobreelevación del mar por tormentas y si la geología litoral la componen sedimentos suaves se presenta una substancial erosión.

Afectaciones causadas por el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos: Ernesto (2012), Dean (2007), Roxanne (1995) y Brenda (1973).

☪ Tormenta tropical Ernesto (2012)

La tormenta tropical “Ernesto” a las 13:00 horas del 8 agosto, se ubicó en tierra, a 27 km al Sureste de Punta Xochen, Camp, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h; por la tarde de este mismo el día, ya se encontraba nuevamente en el mar, a 50 km al Noreste de Ciudad del Carmen, Camp., donde encontró condiciones favorables para ganar fuerza, iniciando un periodo de fortalecimiento sobre el Sur del Golfo de México, mientras se desplazaba con rumbo hacia la costa Sur de Veracruz, hasta alcanzar vientos máximos sostenidos de 110 km/h con rachas de 130 km/h a 65 km al Nor-Noreste de Coatzacoalcos, Ver., el día 9 por la mañana. Derivado de los fuertes vientos que se presentaron a su paso por Ciudad del Carmen y a las marejadas, el puente La Unidad fue cerrado temporalmente al tránsito vehicular.

☪ Huracán categoría 1 Dean (2007)

Sus vientos alcanzaron velocidades de 139 km/h, dejó 39 muertos tras su paso. Tocó el territorio nacional el 21 de agosto. Derribó árboles, postes, anuncios, bardas, techos y dejó a más de 800 personas sin hogar. Ya debilitado, continuó su trayectoria hacia Campeche. En Ciudad del Carmen se reportó la inundación del 60% de la ciudad. Además, causó deterioros graves en las instalaciones industriales de P.E.P. en Cd. del Carmen (Terminal Marítima de Pemex “Puerto Isla del Carmen” (Laguna Azul), la Terminal de Servicios Aéreos de P.E.P., el C. A. S. E. S. - R.M.NE. y el Área Industrial del KM. 4+500), principalmente en techumbres por desprendimiento de láminas metálicas, láminas acrílicas translúcidas, láminas de policarbonato celular, extractores atmosféricos, humedecimiento de plafones y derrumbes de muros dejando algunas de éstas instalaciones en condiciones inseguras e ineficientes.

☉ Huracán categoría 1 Roxanne (1995)

En Ciudad del Carmen, el huracán el Roxanne destruyó los muelles de descarga de camarón de dos plantas congeladoras; resultaron destruidos todos los puestos del mercado popular de pescados y mariscos. Hubo daños a 12 embarcaciones mayores, 183 motores y pérdida de 2,771 artes de pesca. La flota camaronera de altura paralizó sus actividades. Al respecto, el gobierno federal determinó la aportación de un fondo por 6.5 millones de pesos para reactivar la pesca en la entidad y la puesta en marcha de nuevos proyectos de fomento. De ese fondo, la SEMARNAP aportó 4.5 millones y FONAES el resto; por su parte, el gobierno estatal destinó 3.5 millones de nuevos pesos adicionales. Agrupaciones de atuneros del Pacífico se comprometieron a aportar 27 toneladas de atún empacado a los pescadores campechanos damnificados. Además, provocó un retroceso costero en ciertos sectores y una acumulación de sedimentos en otros, cercanos a la zona de estudio. Los procesos erosivos dañaron y destruyeron la infraestructura carretera a lo largo de 21 km entre Cd. del Carmen y Puerto Real y el área de alto riesgo por la acción del oleaje abarcó entre 80 y 150 m de la costa, alcanzando localmente un máximo de 300 m.

☉ Huracán categoría 1 Brenda (1973)

Aproximadamente 24 horas después de tocar tierra, el centro del huracán Brenda pasó sobre la ciudad de Mérida, Yucatán. El giro de Brenda hacia el suroeste y el sur fue muy inusual para una tormenta de agosto. Brenda fue el primer huracán registrado que afectó la costa sureste de la Bahía de Campeche al trasladarse a tierra desde el Golfo de México. Los únicos otros ciclones tropicales de intensidad de tormenta que se movieron a tierra en el área de ciudad de Carmen, Campeche ocurrieron en mayo de 1933, y en octubre de 1922 y 1936. Después de trasladarse tierra adentro, Brenda se debilitó rápidamente a una depresión en la mañana del 22 de agosto y se disipó más tarde ese día. Diez personas murieron en las ciudades costeras debido a las inundaciones generadas por la marea de tormenta que se produjeron desde Veracruz hasta Campeche. El pueblo de Campeche se inundó en un 80%, la peor inundación en 25 años. El huracán destruyó el 50% de las casas en los municipios costeros del estado de Tabasco, dejando a 2000 personas sin hogar. Otras 2000 personas perdieron sus hogares en ciudad del Carmen.

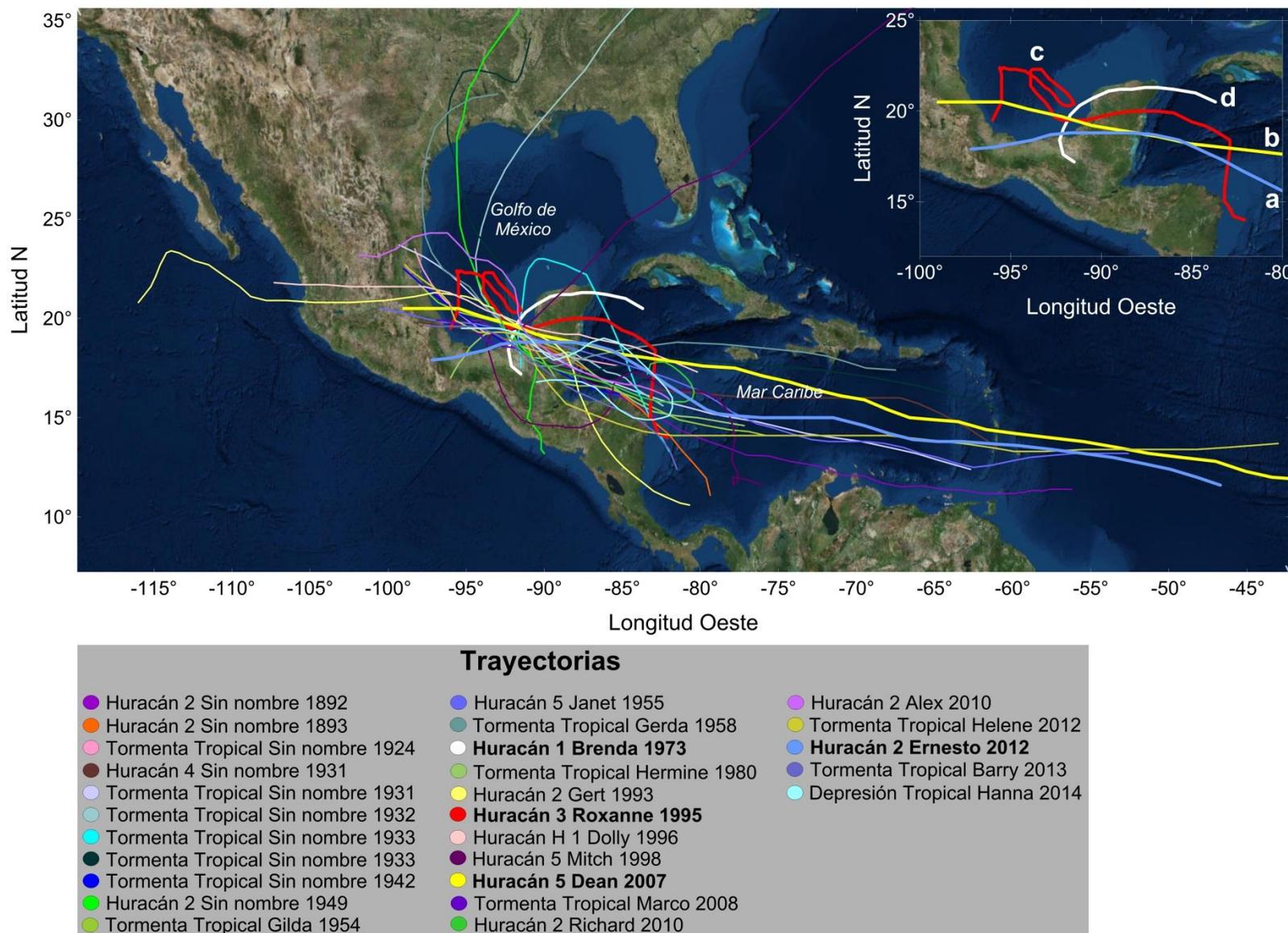


Figura 7.23. Trayectoria de los principales ciclones tropicales que afectaron Ciudad del Carmen, Campeche: En el recuadro a) Huracán 2 Ernesto (2012); b) Huracán 5 Dean (2007); c) Huracán 3 Roxanne (1995) y d) Huracán 1 Brenda (1973). Los datos de las trayectorias fueron tomados de <https://www.coast.noaa.gov/hurricanes/>.

7.6 Índice de fragilidad ambiental de la zona litoral

En este estudio, se ponderaron las variables o componentes geomorfológicos de las bocas lagunares del Carmen y Puerto Real como la línea de costa, los tipos de sedimentos, los cambios morfológicos, la incidencia de ciclones tropicales y la afectación causada por estructuras civiles como los puentes que conectan a la Isla del Carmen con el continente, y únicamente los asentamientos humanos ubicados en los sitios de interés. De acuerdo al análisis de línea de costa, cada uno de los sitios a evaluar fue delimitado por los procesos dominantes (erosión, acreción o ambos).

La fragilidad ambiental de los componentes o parámetros evaluados puede variar de una temporada a otra, independientemente de su génesis y, en consecuencia, las categorías de fragilidad definidas en esta investigación solo son válidas para esta área de estudio. Este índice, además de los componentes, depende de la superficie establecida para cada sitio, ya que esto influye en las diferencias del valor obtenido del IFA para cada uno (Tabla 7.7).

Tabla 7.7. Superficies consideradas para evaluar los diferentes componentes del IFA.

Sitio	Línea costa, CT y puentes-AH		Sedimentos y perfiles playa	
	Superf. Total (m ²)	% superficie	Superf. Total (m ²)	% superficie
El Zacatal	59,457.78	19.58	28,348.15	19.85
Playa Norte	84,351.98	27.77	37,369.52	26.17
Puerto Rea	91,175.34	30.02	31,243.90	21.88
Isla Aguada	68,750.15	22.63	45,858.99	32.11
Total	303,735.25	100.00	142,820.56	100.00

De acuerdo con la superficie impactada por cada componente y a la calificación que evalúa el efecto (positivo o negativo), el valor μ fue de 284 y de σ de 77. A partir de estos valores se calcularon los intervalos del índice de fragilidad (Tabla 7.9) y se obtuvieron los siguientes resultados:

En el Zacatal el índice de fragilidad (IF) ambiental obtenido fue de 235, es decir presenta una fragilidad baja, siendo los parámetros o componentes que tuvieron mayor efecto en esta cuantificación, la incidencia de ciclones tropicales (CT), la línea de costa y la forma de la playa, Mientras que, en Playa Norte, el IFA fue de 225, es decir, presenta una fragilidad baja, las variables con mayor efecto fueron incidencia de CT y la línea de costa. Puerto Real tuvo un IFA de 362, es decir, presentó una fragilidad alta, en este sitio todas las variables incidieron sobre este índice. Y finalmente, Isla Aguada presento un IFA de 283 y una fragilidad baja (Tablas 7.8 y 7.9, Figura 7.24).

Tabla 7.8. Índice de Fragilidad obtenido para cada sitio.

Parámetro	Playa			
	El Zacatal	Playa Norte	Puerto Real	Isla Aguada
Línea costa	54	52	86	37
Sedimento	20	26	66	78
Forma playa	60	26	66	32
Incidencia CT*	59	83	90	68
Puentes-AH**	43	37	85	68
Subtotal IF	235	225	392	283
Fragilidad	Baja	Baja	Alta	Baja

Tabla 7.9. Intervalos de las categorías de fragilidad obtenidas.

Intervalo	Categoría de fragilidad	
>	437	Muy Alta si I.F.U. > $(\mu + 2\sigma)$
437	361	Alta si $(\mu + 2\sigma) > \text{I.F.U.} > (\mu + \sigma)$
361	284	Media si $(\mu + \sigma) > \text{I.F.U.} > \mu$
284	207	Baja si $\mu > \text{I.F.U.} > (\mu - \sigma)$
207	>	Muy Baja si $(\mu - \sigma) > \text{I.F.U.}$

*Ciclones tropicales

**Asentamientos humanos.

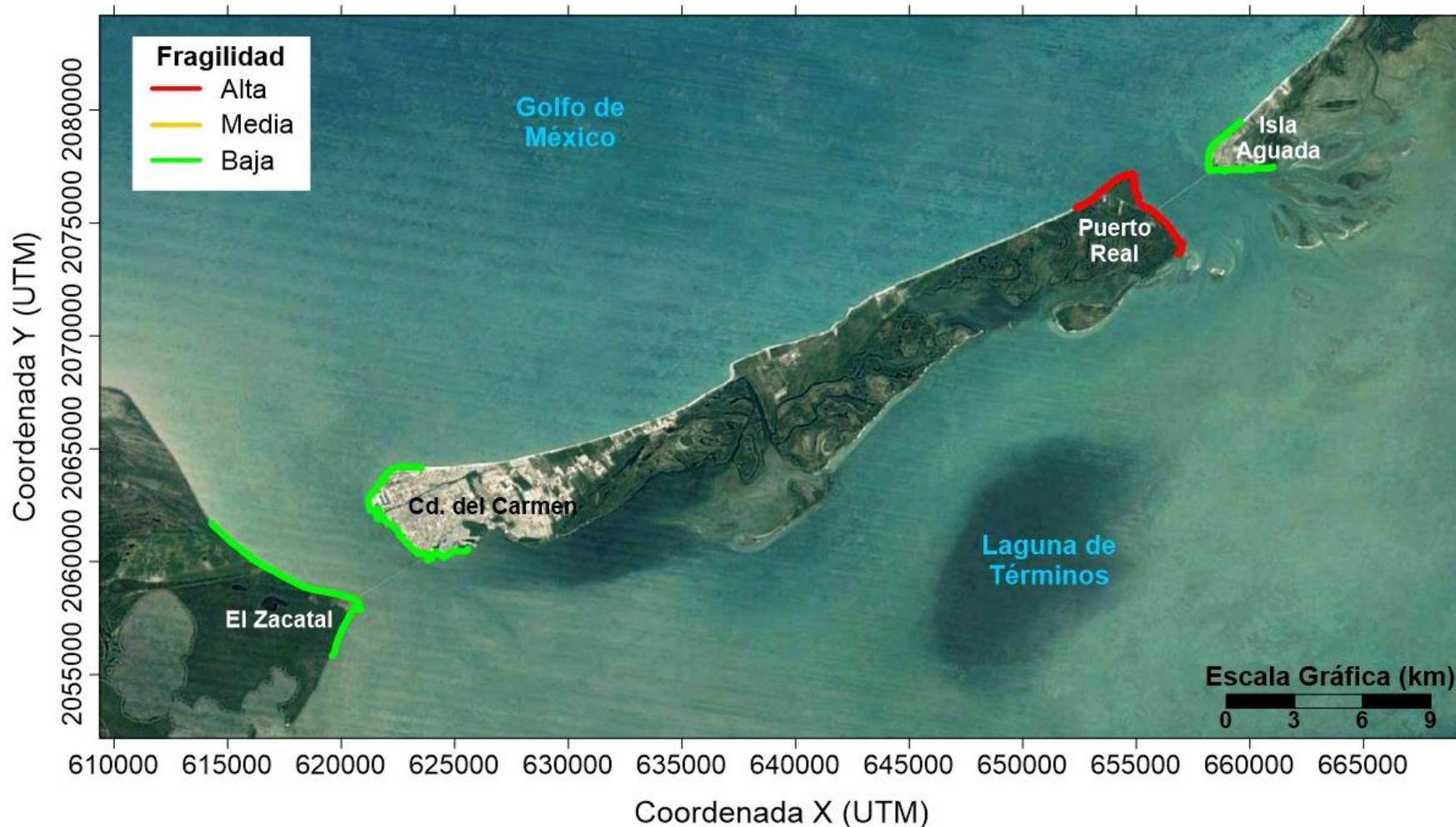


Figura 7.24. Fragilidad ambiental de las bocas lagunares de Laguna Términos.

8. DISCUSIÓN

La Laguna de Términos es considerada como uno de los ecosistemas lagunares-estuarinos más extensos e importantes de México, su planicie costera forma parte de la compleja llanura deltaica del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta, cuyas descargas de agua dulce y terrígenos hacia el mar, son las mayores del país. Adicionalmente, constituye la zona de transición entre la zona de sedimentos carbonatados provenientes de la Península de Yucatán y los terrígenos provenientes de las descargas del sistema Grijalva-Usumacinta.

8.1 Variaciones en el litoral de la Boca del Carmen

A partir del análisis de imágenes de satélite realizado en este estudio, se encontró que los procesos de avances y retrocesos de las variaciones de la línea de costa encontradas para el Zacatal y Playa Norte concuerdan con lo reportado por Palacio (2001), Márquez (2011) y Carranza, *et al* (2015). En el caso de El Zacatal, el proceso dominante fue la erosión, con una tasa de 1.13 m/año. Y para Playa Norte, la acumulación fue dominante sobre la erosión, con una tasa de acreción 0.22 m/año.

Palacio (2001) observó que en la punta de Zacatal, los procesos erosivos son dominantes. Entre 1974 y 1986 se encontró un primer periodo regresivo, y la tendencia se mantuvo entre 1986 y 1992 al no mostrar un periodo acumulativo. Esto se corroboró al encontrar afloramientos de raíces y estructuras edáficas de pedestal en el manglar, así como por la apertura de canales y paleocanales que dividieron los canales de los cordones litorales de reciente formación. Caso contrario sucedió hacia la parte occidental de la Isla del Carmen (Playa Norte) donde la tendencia de la línea de costa fue acumulativa sin sucesión de periodos erosivos.

Márquez (2011), identificó dos procesos geológicos de la zona litoral: 1) erosión continua y 2) fluctuación erosión-depósito. El primero está asociado con el fenómeno de transgresión, que está caracterizado por el retroceso de la línea de costa hacia el continente. En este proceso de erosión-depósito, la línea de costa sufre una constante erosión y recuperación a través del depósito de sedimentos.

En ese mismo trabajo, Márquez (2011), identificó que en el sitio de El Zacatal el proceso erosivo fue dominante, mientras que, en Playa Norte fueron evidentes los procesos de erosión-acumulación, los cuales se deben a la acumulación de sedimentos que el transporte litoral lleva a lo largo de la isla del Carmen hacia la zona de Playa Norte, donde se depositan.

Carranza, *et al* (2015), compararon las variaciones morfológicas y sedimentológicas de diversas playas del sur del Golfo de México, encontrando que en Playa Norte, ha habido un proceso de

“progradación” , además los avances y retrocesos de la línea de costa fueron menores a los 100 m, suponiendo una estabilidad para este sitio.

Para el caso de los sedimentos presentes en los sitios evaluados los resultados obtenidos en este estudio, mostraron variaciones entre las subzonas de la playa, desde arenas gruesas a finas, en ambos sitios, sin embargo, las arenas finas prevalecieron sobre los demás tamaños. Esto concuerda con lo reportado por Yáñez-Correa (1969), Ayala-Castañares (1990) y Márquez-García (2011).

Yáñez-Correa (1969), encontró que los sedimentos superficiales de la plataforma continental frente a la Laguna de Términos, pertenecen a dos grupos principales, los terrígenos compuestos de material aluvial limos-arcilloso y de arenas con alto contenido de cuarzo, de tamaño de grano fino a medio, localizados al poniente de la laguna en los sitios de El Zacatal y Playa Norte.

Por otro lado Ayala-Castañares (1990), reportó que los sedimentos de la parte occidental de la boca del Carmen (El Zacatal), corresponden a arenas muy finas mientras que, hacia Playa Norte estos sedimentos estuvieron remezclados con limos muy finos y arcillas gruesas.

Márquez-García (2011), reportó la prevalencia de arenas muy finas sobre arenas medias y gruesas en El Zacatal y de arenas finas sobre medias y gruesas en Playa Norte.

8.2 Variaciones en el litoral de la Boca de Puerto Real

En este estudio, el análisis de la línea de costa mostró que en la zona de Puerto Real, la erosión fue el proceso dominante, con una tasa de erosión de 1.04 m/año. En el caso de Isla Aguda, el proceso de acreción fue mayor a la erosión, con una tasa de acreción menor a 1 m/año. Esto es semejante a lo reportado por Márquez-García (2011) y Carranza *et al*, (2015). Márquez-García (2011) identificó una baja tasa de erosión desde la Isla del Carmen hasta Champotón, que se evidenció en campo con los levantamientos de perfiles de playas realizados en ese mismo estudio en el sitio conocido como Punta Real, donde no se observaron cambios en la morfología al encontrarse sobre un litoral rocoso. En el caso de Isla Aguada, la amplitud promedio de la playa fue de 85 m, debido a que el transporte litoral aportó una gran cantidad de material arenoso desde Sabancuy. Carranza *et al*, (2015), reportaron que este sitio presentó cambios en la extensión de la playa, siendo mayor para el 2007, respecto a un muestreo realizado anteriormente.

En este estudio, los sedimentos encontrados corresponden a tamaños de granos muy gruesos a gruesos, en el caso de Isla Aguada y de arenas muy gruesas a medias, con predominio de

conchas, fragmentos de ellas y fragmentos rocosos en Puerto Real, lo que es semejante a lo descrito por Yáñez-Correa (1969); Jiménez (1979), Márquez-García (2011) y Carranza *et al.* (2015).

Los dos primeros autores encontraron que el material presente en Puerto Real e Isla Aguada, mostró una gradación del tamaño de grano que va de arenas finas a gruesas y algunas gravas, formadas por conchas o fragmentos de las mismas. Márquez-García (2011), también reportó la presencia de sedimentos de origen biogénico con tamaños de arenas muy gruesas a gruesas en Puerto Real. En Isla Aguada, las arenas presentes fueron de gruesas a medias, compuestas por material calcáreo. Carranza *et al.* (2015), mencionaron que los sedimentos carbonatados del sur del Golfo de México, presentan una mayor variación en el tamaño de grano, debido principalmente a la presencia de conchas de molusco que da como resultado sedimentos gruesos.

La morfología, la sedimentación, la influencia de la descarga de los ríos, las mareas y corrientes litorales, así como las variaciones estacionales y la incidencia de tormentas tropicales dan lugar a la conformación de los sistemas litorales actuales. En la boca del Carmen, las variaciones litorales se deben a su origen deltaico, caracterizado por la presencia de sedimentos terrígenos compuestos de material aluvial y de tamaño medios a finos, que presentan una rápida acumulación sedimentaria. Así como al aporte de los sedimentos llevados a través de la boca del Carmen por el delta de reflujo que descarga mar abierto y que provienen de los ríos Palizada (que descarga a la laguna a través del estero de Boca Chica), el San Pedro y San Pablo (que es un tributario del río Usumacinta), el Chumpán y el Candelaria, ya que estos últimos tienen su desembocadura hacia la Laguna de Términos. Además, Yáñez-Correa (1969), Ayala-Castañares (1990), Márquez-García (2011), Carranza *et al.* (2015), mencionan a este sitio como la zona de transición entre los sedimentos terrígenos y los carbonatados procedentes de la plataforma de Yucatán. También, la disminución del aporte de los sedimentos fluviales hacia la costa, impide la llegada y acumulación de los sedimentos en las playas, lo que eventualmente provocará su erosión.

En la boca de Puerto Real, la zona litoral está conformada en su mayor parte por una plataforma rocosa, que minimiza el efecto de la erosión, al brindar mayor resistencia a este proceso. Además, los sedimentos de origen biogénico son el resultado de la productividad en la plataforma de Campeche, de donde son llevados por la corriente de Yucatán hacia el oeste, y cerca de la costa, las corrientes litorales y el oleaje los arrastran hacia el interior de la laguna, generando un delta de flujo de marea en esta boca.

8.3 Efectos producidos por ciclones tropicales

Además de los factores mencionados anteriormente, hay que sumar el impacto de las tormentas tropicales y el efecto provocado por los nortes. En la región, el régimen de los vientos está formado por dos sistemas dominantes; el primero que va de octubre a febrero y con dirección noroeste. Estos se originan por el movimiento de las masas de aire frío y seco provenientes de Estados Unidos y Canadá, que interactúan con las masas de tropicales del golfo de México, formando los “nortes”. La acción combinada de los nortes, las corrientes litorales, la refracción del oleaje y la rompiente de las olas sobre la playa, generan la resuspensión y consecuentemente el transporte del sedimento.

En el caso de las mareas de tormenta, es el ascenso en el nivel del mar producido por la acción de los vientos durante un ciclón tropical sobre el océano, el que genera mayor suspensión del sedimento debido a que la marea de tormenta puede tener una duración de 12 horas a 3 días, estas mareas causan la remoción de arena de las playas por el transporte litoral producido por el oleaje que genera y el arrastre de sedimentos de las zonas de inundación que son afectadas.

En este estudio, se detectó que varios ciclones han impactado la zona, como es el caso de Dean en 2007 y Ernesto en 2012. En el análisis de línea de costa, se observó un incremento en las superficies perdidas (siendo mayores a los 20, 000 m², en un lapso muy corto entre imagen e imagen) en los cuatro sitios de monitoreo, correspondientes a las fechas en que impactaron estos ciclones.

Palacio-Prieto y Ortiz-Pérez (1999) evidenciaron los efectos producidos en la geomorfología costera de Campeche por el huracán Roxana, que se presentó del 8 al 19 de octubre de 1995, donde las diferencias en la litología tuvieron una respuesta significativa a la acción erosiva del huracán ya que en una zona con un litoral rocoso el efecto fue relativamente estable, mientras que en un litoral formado por sedimentos arenosos existió una gran dinámica costera y cambios en la morfología de la misma.

8.4 Fragilidad de las bocas de Lagunas de Términos

En este estudio, se cuantificaron las variables o componentes de línea de costa, tipos de sedimentos, cambios morfológicos, incidencia de ciclones tropicales y afectación causada por estructuras civiles como los puentes que conectan a la Isla del Carmen con el continente y únicamente los asentamientos humanos ubicados en los sitios de interés.

Considerando todos los parámetros para cada zona de estudio la boca del Carmen (El Zacatal y Playa) e Isla Aguada presentaron una fragilidad baja, mientras que, en Puerto Real fue alta.

En el caso de El Zacatal, el parámetro del sedimento es el que presentó un valor más bajo de calificación, lo que ayudó a definir el grado de fragilidad. Esto se explica porque en la sedimentología de los tres principales grupos de partículas consideradas (arenas, limos y arcillas), son las arenas las que presentan mayor inestabilidad o menor resistencia al movimiento que los limos y las arcillas, debido a que es un material no-cohesivo. Los sedimentos presentes en el Zacatal son principalmente materiales finos a muy finos. Lo mismo sucede para Playa Norte, donde los parámetros de tipo de sedimento y forma de la playa, presentaron los valores más bajo de la calificación del índice. En este sitio al igual que en El Zacatal los sedimentos dominantes son los materiales finos, y en el caso del perfil de playa, dependiendo de la forma y la pendiente se incrementa o disminuye el grado de susceptibilidad. Las formas convexas y las pendientes suaves tienen una fragilidad baja, como el caso de Playa Norte.

Respecto a Isla Aguada, que también presentó una fragilidad baja, los parámetros que tuvieron los valores más bajos fueron la línea de costa y la morfología de la playa, es decir, presenta procesos de acumulación y perfiles de playa amplios y con pendientes suaves. En el caso de Puerto Real, todos los parámetros presentaron valores altos, es el sitio con la mayor superficie erosionada, el sedimento está formado por arenas gruesas, al igual que los otros sitios se ve afectado por los ciclones tropicales. Estos valores del grado fragilidad fueron determinados considerando las principales variables o factores que afectan a la zona litoral, por lo que cada variable tiene un valor numérico según la intensidad de los cambios o modificaciones ocasionadas y está asociado a la respuesta ambiental del parámetro a evaluar.

Palacio (2004) realizó un estudio sobre la susceptibilidad del terreno ante la incidencia de huracanes en el estado de Campeche, en el cual consideró como variables más significativas de esa fragilidad las siguientes: fijación biogénica, movilidad del sustrato, predisposición dinámica de las geoformas (interfase continental y marina), evidencias sedimentarias y morfológicas del oleaje de tormenta, ubicación relativa de la amenaza en perfil transversal de afectación y el comportamiento del fenómeno. Los sitios de Playa Norte, Puerto Real e Isla Aguada, se agruparon dentro de la categoría de fragilidad muy alta, mientras que, El Zacatal en la de categoría alta.

Sin embargo, cabe mencionar que en ese estudio las variables se cuantificaron en función del impacto que los huracanes tienen sobre ellos, es decir, considerando una escala temporal corta.

Estos resultados parecen contradictorios a lo presentado por Palacio (2004), sin embargo, debe considerarse que la escala de cuantificación, en el reciente estudio abarca un periodo temporal más amplio (línea de costa), además de que esta evaluación está en función de la respuesta del ambiente a los diversos componentes evaluados, considerando las características de los sitios de estudio *per se*.

Además, el análisis de los sitios estudiados no parte de la situación original, sino de las condiciones actuales, por lo cual, los resultados obtenidos deben interpretarse a partir de los cambios que los sitios de interés han experimentado. Así mismo, los indicadores son complementos importantes para el análisis de fragilidad, y son la herramienta de diagnóstico que posibilita la mejor toma de decisiones que impactarán a la región en estudio.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los procesos morfodinámicos evaluados mediante el análisis de líneas de costa (2004-2013) y los levantamientos de los perfiles de playa (2014) en la zona litoral de las bocas lagunares de la Laguna de Términos, evidenciaron los procesos erosivos a los cuales está sometida la boca del Carmen, en su parte occidental en el sitio de El Zacatal y la boca de Puerto Real, en el sitio que da nombre a la boca, con tasas de erosión de 1.13 y 1.04 m/año. Hacia la margen este de la boca del Carmen y en la margen este de la boca de Puerto Real, el fenómeno de acreción es el dominante, con tasas de avance de 0.22 y 0.86 m/año.

En el caso de la boca del Carmen, las variaciones en el litoral se deben a su origen deltaico, caracterizado por la presencia de sedimentos terrígenos, compuestos de material aluvial de tamaño medios a finos, y que presentan una rápida acumulación sedimentaria

En la boca de Puerto Real, la zona litoral está conformada en su mayor parte por una plataforma rocosa, que minimiza el efecto de la erosión, al brindar mayor resistencia a este proceso. Además, los sedimentos de origen biogénicos son el resultado de la productividad en la plataforma de Campeche, de donde son llevados por la corriente de Yucatán hacia el oeste, y cerca de la costa, las corrientes litorales y el oleaje los arrastran hacia el interior de la laguna, generando un delta de flujo de marea en esta boca.

Adicionalmente, por su ubicación geográfica, estos sitios sufren los efectos derivados de la presencia de eventos hidrometeorológicos, como ciclones tropicales, que se producen en el Golfo de México, así como de la presencia de los nortes durante octubre-febrero, lo que magnifica los procesos erosivos en la zona.

Para este estudio, los sitios de El Zacatal, Playa Norte e Isla Aguada presentaron una fragilidad ambiental baja, relacionada con el tipo de sedimento (Zacatal y Playa Norte), la forma y pendiente de la playa (Playa Norte e Isla Aguada) y las variaciones históricas de la línea de playa (Isla Aguada). Por su parte Puerto Real presentó una fragilidad alta y al igual que los otros sitios estuvo relacionada con sedimentos (gruesos), las variaciones en la amplitud y pendiente de playa (susceptible a sufrir erosión) y procesos erosivos evaluados mediante las imágenes de satélite.

Los resultados obtenidos permiten concluir que realizar una zonificación de la fragilidad de los sitios de interés, considerando los componentes susceptibles a sufrir mayor deterioro, depende en primer lugar de la escala espacial y temporal con que se evalué. De tal forma, que la aplicación de estos indicadores responde siempre a realidades ambientales concretas y con frecuencia a fenomenologías irrepetibles, por lo que, estos indicadores de la fragilidad, son una

herramienta que permiten detectar las particularidades de regiones específicas, son aplicables a cualquier situación de riesgo en zonas costeras tropicales.

La zona costera, como resultado de la interacción entre ambientes continentales y marinos, requiere que las variables e indicadores representativos incluyan esta interface (marina, litoral y continental) para que la información obtenida represente de una manera más real cómo el ecosistema responderá ante el impacto de fenómenos naturales y de origen antropogénico.

La evaluación del estado que guarda un sitio a través de los indicadores anteriormente descritos permiten establecer oportunamente criterios y toma de decisiones para contrarrestar las causas y efectos adversos que en él se producen.

Por lo que es recomendable, investigar con mayor profundidad, los planes, proyectos y programas de infraestructura que se pretendan realizar a nivel local y regional, para pronosticar el comportamiento futuro de las alteraciones al medio, con la finalidad de prever escenarios tendientes a incrementar la degradación ambiental.

Así mismo, cualquier obra o actividad que se desee llevar a cabo, tiene que contar con un estudio de la dinámica del sitio, modelando antes y después de la obra, en el que se deberá aportar información sobre la fuente del material arenoso, transporte litoral de sedimentos y condiciones de erosión-acreción.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Jr., M. (1961). Provincias fisiográficas de la República Mexicana. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, 24(2), 1-21.
- Andrade, B., Lagos, M., & Arenas, F. (2004). Cuantificación de procesos morfogénicos actuales como indicador de la fragilidad de unidades fisiográficas en la costa de la región de O'higgins. *Revista de Geografía Norte Grande*, 31, 63-72.
- Ayala-Castañares, A., & Gutiérrez-Estrada, M. (1990). Morfología y sedimentos superficiales de la plataforma continental frente a Tabasco y Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*.
- Begon, M., Harper, J., & Townsend, C. (1988). *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Omega.
- Bonilla-Barbosa, J. R. (2007). *Flora acuática vascular y de zonas inundables del área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Campeche, México*. México, D. F.: Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigaciones Biológicas.
- Botello V., A., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., & Rojas-Galaviz, J. L. (Edits.). (2010). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Gobierno del Estado de Tabasco, SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Calvo García-Tornel, F. (1984). La Geografía de los riesgos. *Geocrítica. Cuadernos críticos de Geografía Humana*, IX(54), 37.
- Carranza-Edwards, A., & Caso-Chávez, M. (1994). Zonificación del perfil de playa. *Geo-UNAM*, 2(2), 26-32.
- Carranza-Edwards, A., Márquez-García, A. Z., Tapia-González, C. I., Rosales-Hoz, L., & Alatorre-Mendieta, M. A. (2015). Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, 67(1), 21-43.
- Centro de Estudios Geomáticos Ambientales y Marinos (Geomar). (2019). *Datos de las magnitudes de corrientes y batimetría en Ciudad del Carmen, Campeche*. CDMX.
- CONACYT-ANIDE. (2012). *Impacto de la erosión costera en el hábitat de anidación de tortugas marinas en escenarios de cambio climático: Caso Campeche*. ANIDE. CONACYT.
- Diario Oficial de la Federación. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks* (Edición electrónica 2002 ed.). Austin, Texas: Hemphills Publishing Company.
- García, E. (1988). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. México, D. F.: Offset Larios.

- Gómez R., M., & Reséndiz E., I. N. (2002). Seguimiento de nortes en el litoral del golfo de México en la temporada 1999-2000. *Revista Geográfica*, 131, 5-19.
- Instituto Nacional de Ecología. (1997). *Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos*. México. D. F.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2013). *Glosario: términos comunes de la Dirección General de Investigación en Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas*. Recuperado el 27 de noviembre de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/glosario>
- Jiménez S., O. H. (1979). Análisis granulométrico de los sedimentos superficiales de la boca de Puerto Real, en la Laguna de Términos, Estado de Campeche. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, Tomo XL(1 y 2), 20.
- Krumbein, W. C., & Sloss, L. L. (1963). *Stratigraphy and sedimentation* (2nd ed.). San Francisco: W. H. Freeman.
- Lankford, R. R. (1977). Coastal lagoons of Mexico: Their origin and classification. En M. Wiley (Ed.), *Estuarine Processes* (Vol. 2, págs. 182-215). New York: Academic Press.
- Lewis, D. (1994). *Practical Sedimentology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Mancilla, P. M., & Vargas, F. M. (1890). Los primeros estudios sobre la circulación y el flujo neto de agua a través de la Laguna de Términos, Campeche. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, 11.
- Márquez-García, A. Z. (2002). Topohidrografía, Cartografía y Graficación. En A. Granados Barba, V. Solís Weiss, & R. G. Bernal (Edits.), *Métodos de Muestreo en la Investigación Oceanográfica*. (págs. 77-99). Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Márquez-García, A. Z. (2011). *Procesos de erosión y depositación en el litoral sur del Golfo de México*. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Monreal-Gómez, M. A., Salas-de-León, D. A., & Velasco-Mendoza, H. (2004). La hidrodinámica del Golfo de México. En M. Caso, I. Pisanty, & E. Ezcurra (Edits.), *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. (Primera ed., Vol. 1, págs. 47-68). México, D. F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMANART).
- Montaño-Ley, Y., Gutiérrez-Estrada, M., & Aldeco-Ramírez, J. (1988). Análisis de funciones empíricas de eigen en perfiles de playa de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 15(2), 121-128.
- National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2015). *Tropical Cyclone Reports 1892-2014*. Recuperado el 7 de abril de 2015, de <http://www.nhc.noaa.gov/cyclones/>
- Nowlin, W. D., & Mc Lellan, H. J. (1967). A characterization of the Gulf of Mexico water in winter. *Journal of Marine Research*, 25, 29-59.

- Palacio A. , A. G. (2001). Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas, Bol. Del. Inst. Geografía*, 46, 7-17.
- Palacio A., A. G. (2004). Riesgos naturales y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes, aplicación de SIG en la costa baja acumulativa del suroeste de Campeche. En E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, & F. Rosado May (Edits.), *El manejo costero en México* (págs. 287-306). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Palacio P., J. L., Ortíz-Pérez, M. A., & Garrido, P. A. (1999). Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán "Roxanne". *Investigaciones Geográficas*, 40, 48-57.
- Saborio Víquez, M. d. (2012). *Inclusión del concepto de riesgo dentro del Índice de Fragilidad Ambiental (IFA) realizado para el Cantón de Liberia, Provincia de Guanacaste, Costa Rica*. Instituto de Sostenibilidad. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2012). *Base de datos de ciclones tropicales que afectaron a México durante el período de 1970 a 2011*. Recuperado el 10 de noviembre de 2014, de Subgerencia del pronóstico meteorológico. Comisión Nacional del Agua: <http://smn1.conagua.gob.mx/ciclones/historia/ciclones1970>
- Toledo, S. H. (2011). *Fragilidad, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca baja del sistema Grijalva–Usumacinta*. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Secretaría de Investigación y Posgrado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco.
- Wentworth, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.*, 30, 377-392.
- Yáñez-Arancibia, A. (1986). *Ecología de la zona costera*. México: A. G. T. Editor.
- Yáñez-Arancibia, A., Zárate Lomelí, D., & Rojas Galaviz, J. L. (1994). *Estudio de Declaratoria como Área Ecológica de Protección de Flora y Fauna Silvestre de la Laguna de Términos, Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche, Programa de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX).
- Yáñez-Correa, A. (1969). Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al sur de la Bahía de Campeche. *Bol Soc. Geol. Mexicana* , 32(2), 75-115.