

Anexo X

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO EN

ISLA DEL CARMEN

ÍNDICE

X.1. Clima	1
X.2. Daños registrados por la ocurrencia de fenómenos naturales extremos	2
X.2.1. Daños por huracán Dean (Agosto, 2007)	3
X.2.2. Daños por huracán Roxanne (Octubre, 1995)	3
X.3. Topografía y batimetría	10
X.3.1. Batimetría	10
X.3.2. Topografía	13
X.4. Caracterización de los sedimentos.....	15
X.5. Patrón de circulación en la laguna	18
X.6. Análisis de la configuración morfológica de Isla del Carmen.....	18
X.7. Historia de erosión.....	19
X.8. Análisis de la evolución de histórica de playa Tortugeros	26
X.9. Intervención humana	30
X.10. Relación entre historia de erosión, intervención humana y clima	32

X.1. Clima

El clima en el área es clasificado como Aw₁, tipo cálido subhúmedo (Villalobos-Zapata & Mendoza, 2010). Yáñez-Arancibia et al., 2005 definen tres estaciones principales en el año: “Lluvias” (de Junio a Septiembre), donde se produce la ocurrencia de ciclones tropicales procedentes del Océano Atlántico; “Nortes” o frentes fríos (de Octubre a Febrero); y “Secas” (de Marzo a Mayo).

Los “Nortes” se caracterizan por una velocidad del viento predominante superior a 8 m/s en direcciones noroeste y norte-noroeste, dando lugar a la generación de olas de altura entre 2 m y 6 m. Del análisis de la base de datos utilizada (Anexo II), entre tres y ocho frentes fríos al año alcanzan el área; definidos por una altura de ola significativa superior o igual a 2 m, y una duración desde unas pocas horas hasta 6 días los más persistentes.

Los ciclones tropicales registrados en el periodo de 1985 a 2012, donde la evolución de la línea de costa es analizada posteriormente (en apartado X.7), se incluyen en la Tabla X.1. En la Tabla X.2 se incluyen los principales parámetros de viento y oleaje asociados a estos ciclones, a una profundidad de 28 m de datos de reanálisis.

Periodo	Ocurrencia de eventos extremos
1985-1990	No hay registro de ciclones tropicales
	Nortes y otras tormentas menos intensas
1990-1994	No hay registro de ciclones tropicales
	Nortes y otras tormentas menos intensas
1994-2002	Huracán Opal y Roxanne, en Octubre de 1995
	Huracán Mitch, en Noviembre de 1998
	Huracán Keith, en Octubre de 2000
2002-2005	Huracán Isidore, en Septiembre de 2002
2005-2008	Huracán Stan, en Octubre de 2005
2008-2012	Huracán Richard, en Octubre de 2010

Tabla X.1. Presencia de ciclones tropicales, 1985 a 2012.

Ciclón tropical	Duración (h)	H _{rms} (m)	H _{smax} (m)	T _{pmedio} (s)	T _{pmax} (s)	Dir _{media} (°N)	V _{vmedia} (m/s)	V _{vmax} (m/s)	Dir _{vmedia} (°N)
Opal	60	4.0	5.4	7.7	8.9	64	14.5	18.6	200
Roxanne	149	3.6	6.3	8.6	13.6	283	13.6	22.3	293
Mitch	30	3.1	4.9	6.8	8.5	337	12.7	19.0	305
Keith	81	2.0	3.7	5.5	7.5	337	8.3	14.8	319
Isidore	83	3.2	6.6	9.7	11.5	299	11.3	20.5	258
Stan	28	2.8	3.5	6.5	7.2	58	11.8	14.9	123
Dean	28	4.9	8.6	8.6	11.3	65	18.3	31.2	112
Richard	33	2.8	4.0	6.5	7.8	86	10.3	15.2	91

Tabla X.2. Parámetros del viento y oleaje, a 28 m de profundidad, de los ciclones tropicales en el periodo de 1985-2012.

X.2. Daños registrados por la ocurrencia de fenómenos naturales extremos

Algunos de los eventos más intensos que han amenazado el área son los “Nortes” que ocurrieron en Septiembre de 1992 y Agosto de 1995; huracanes como Janet y Hilda, en 1955; Inez, en 1966; Beulah, en 1967; Brenda, en 1973; Opal y Roxanne, en 1995; Mitch, en 1998; Keith, en 2000; Isidore y Stan, en 2002; Dean, en 2007; y Richard, en 2010. La Fig. X.1 muestra algunas imágenes de Ciudad del Carmen durante un Norte y el paso del huracán Dean.



Figura X.1. Paso de “Norte” y huracán Dean por Ciudad del Carmen.

X.2.1. Daños por huracán Dean (Agosto, 2007)

- El 60 % de Ciudad del Carmen fue inundada.
- Interrupción de la actividad petrolera y daños sobre las instalaciones. Se registraron pérdidas de ingresos de producción diaria de 2.7 millones de barriles de petróleo y 2.6 millones de pies cúbicos de gas natural.

X.2.2. Daños por huracán Roxanne (Octubre, 1995)

El huracán Roxanne, en Octubre de 1995, es reconocido como uno de los huracanes más dañinos que afectaron a la Isla. Entre las consecuencias identificadas, se produjo un proceso de brechamiento a mitad Isla del Carmen que provocó la abertura de barra y reactivación de un antiguo canal (“canal de Cocoyotes”) durante la tormenta, comunicando así la laguna con el mar y destruyendo considerable superficie de manglar; 24 kilómetros cuadrados de superficie de la Isla fueron afectados por procesos de overwash; 21 km de la carretera de Isla del Carmen fueron destruidos por el paso del agua y sedimentos acarreados por el oleaje de tormenta ocasionando la deposición de sedimentos en el estero y la destrucción también en esta región de algunos sectores de manglar.

Los estragos del huracán fueron todavía observados desde un helicóptero dos meses posteriores al paso del fenómeno. Se identificaron algunos procesos geomorfológicos y formas resultantes que caracterizaron la línea de costa durante la tormenta como recesiva, con rasgos de acumulación y afectada por procesos de overwash en diferentes sectores de la Isla (Palacio et al., 1999) (Fig. X.2).

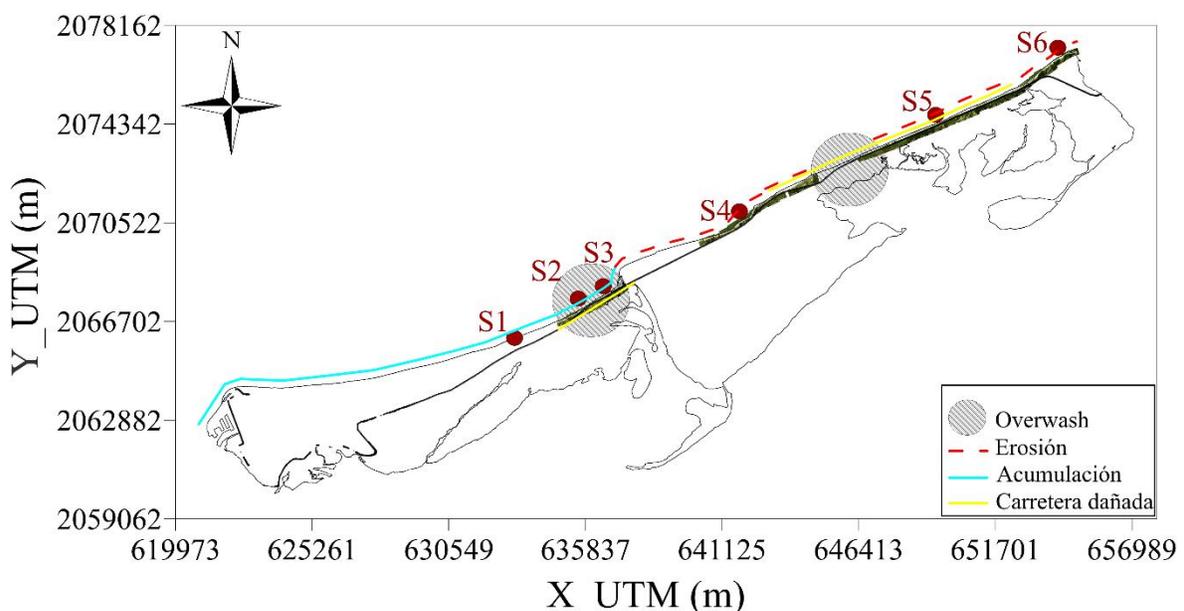
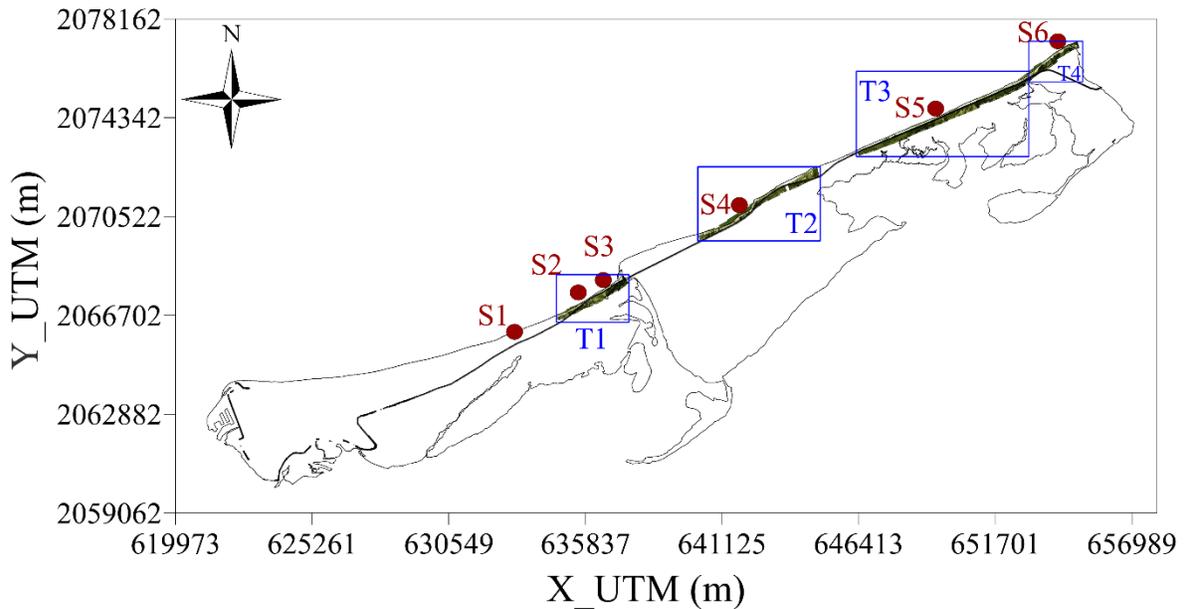


Figura X.2. Impactos del huracán Roxanne en la zona costera de Isla del Carmen, Octubre de 1995, (modificado de Palacio et al., 1999).

Los autores del artículo *Palacio et al., 1999* nos proporcionaron el vídeo que tomaron desde el helicóptero; a partir del cual se extrajeron 71 imágenes que se georreferenciaron para ubicar las zonas más afectadas por el paso del fenómeno. En la Fig. X.3 se muestra la localización de estas imágenes y las regiones que se analizan en mayor detalle en las Fig. X.4 a Fig. X.13 (S1 a S6; T1 a T4).



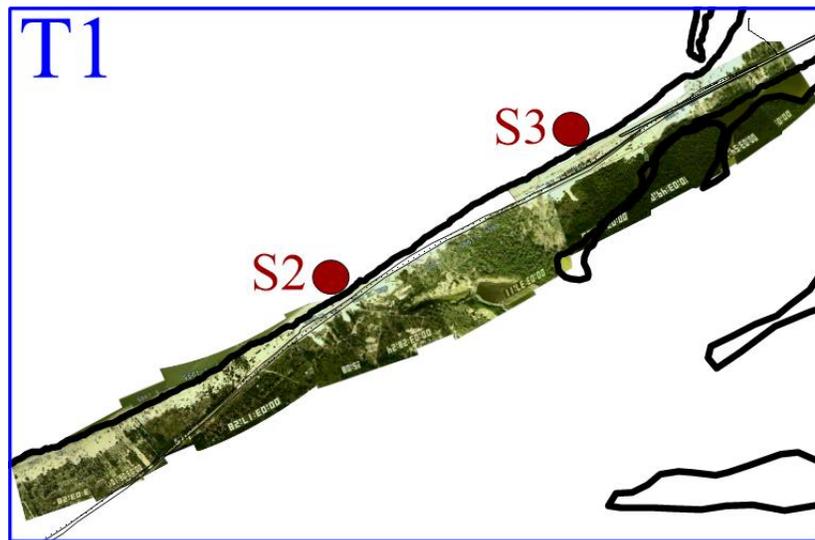
X.3. Localización de las regiones de playa que se analizan mediante imágenes de video para identificar los efectos del huracán Roxanne.

En la Fig. X.4 se aprecia la formación de una secuencia de spits que evidencian proceso de acumulación. Su orientación indica un movimiento de los sedimentos en dirección E-W. Sin embargo, la ubicación de los cocoteros en la rompiente de las olas evidencia el carácter recesivo de la costa, lo que pone de manifiesto la alternancia de procesos erosivos y acumulativos.



Figura X.4. Identificación de spits en la costa de Isla del Carmen (sección S1 en Fig. X.3).

En la Fig. X.5 se muestra con mayor detalle el aspecto de la playa en el tramo T1 de la Fig. X.3.



X.5. Detalle en región de playa T1.

La acción del oleaje y el poder erosivo del mismo fue causante de daños en la infraestructura carretera. A lo largo de 21 km, la carretera Ciudad del Carmen-Puerto Real fue afectada en diferentes grados, siendo totalmente destruida en diversos tramos localizados a menos de 150 m de la línea de costa. La figura X.6 muestra un tramo de la carretera afectada, donde se aprecia la nueva capa asfáltica que comienza a ser reconstruida y la carretera destruida por erosión marina.



Figura X.6. Detalle en sección de playa S2, donde se observan los estragos sobre la carretera, el tendido de la nueva capa asfáltica y el estero de los Cocoyotes.

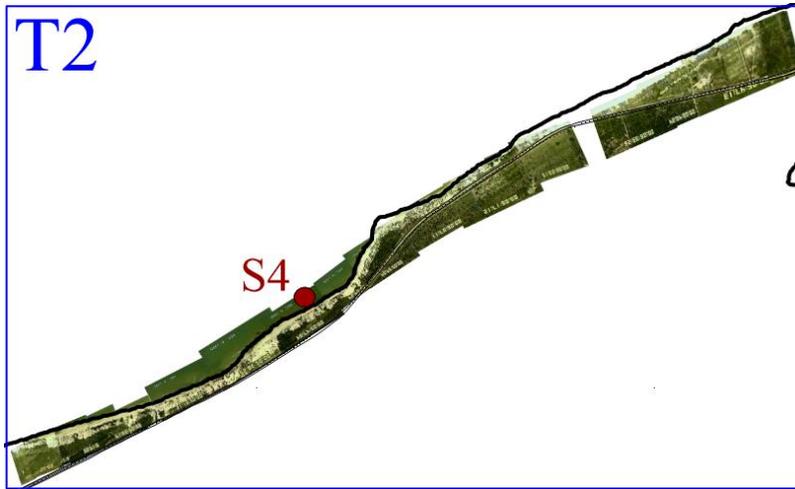
En la Fig. X.7 se pueden observar los entrantes de arena que se identificaron en varias regiones a lo largo de toda la barra que constituye la Isla.



Figura X.7. Acumulaciones de arena en forma de “lenguas” (varían en promedio alrededor de 80 m y alcanzan localmente más de 300 m (sección S3).

En la Fig. X.8 muestra el detalle de la región T2 de la Fig. X.3, y la Fig. X.9 en particular de la sección S4. Se observan las formaciones rocosas en la costa excavadas y descubiertas por la acción del oleaje. La morfología sinuosa dada por estas rocas de playa en el sector oriental de la barra es contrastante con la homogeneidad del trazo rectilíneo de la costa arenosa en la región occidental, lo que sugiere una deriva de playa con dirección noroeste-

sureste, lo que concuerda con la dirección de las barras (spits) descritas anteriormente, o el límite de la plataforma calcárea de Yucatán.

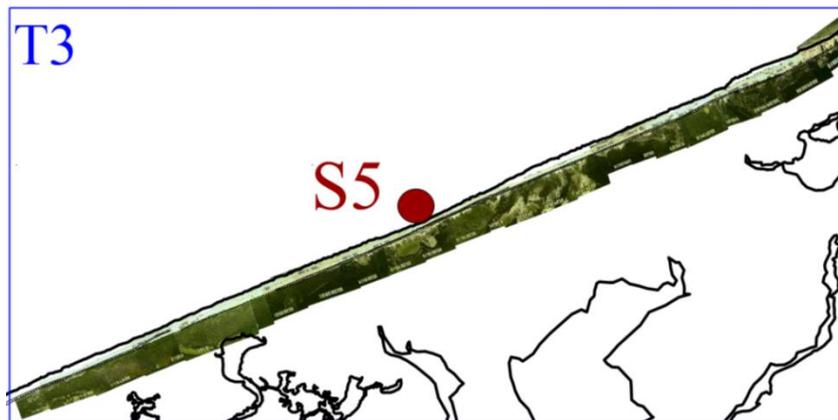


X.8. Detalle en región de playa T2.



Figura X.9. Presencia de lajas rocosas en región oriental de Isla del Carmen (sección S4).

La Fig. X.10 muestra el aspecto del área definida como T3 en Fig. X.3, y la Fig. X.10 una determinada región de ésta donde se puede visualizar el depósito de arena en el estero debido al proceso de overwash que tiene lugar.



X.10. Detalle en región de playa T3.



Figura X.11. Depósito de arena en el estero como consecuencia de un proceso de overwash (sección S5).

Por último, la Fig. X.12, y con mayor detalle la Fig. X.13, permite observar la función de la vegetación en la protección costera al penetrar la transgresión arenosa tierra adentro de manera significativamente mayor en los tramos deforestados que en los cubiertos por vegetación.

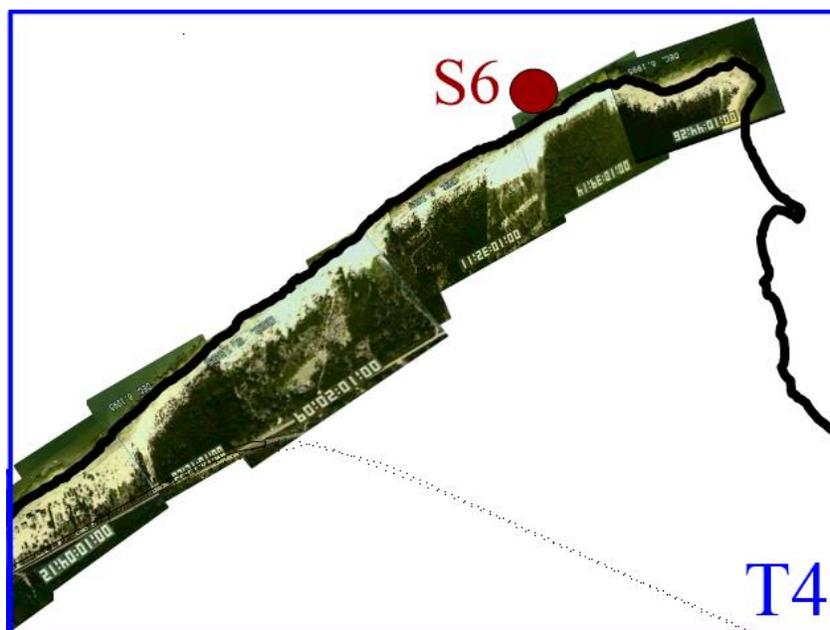


Figura X.12. Detalle en región de playa T4.



Figura X.13. Entrada de arena tierra adentro, más notable en las áreas deforestadas que en las forestadas (sección S6).

En cuanto a la incidencia del huracán Roxanne en Ciudad del Carmen, la trayectoria del huracán regresó cuando ya había pasado el 11 de Octubre de 1995 y ocasionó daños graves por inundaciones severas y la rotura de cinco tramos del acueducto que abastece de agua potable a la población.

X.3. Topografía y batimetría

X.3.1. Batimetría

La construcción de la batimetría se realizó a partir de la recopilación de datos de diversas fuentes:

(1) Márquez et al., 2008. Estudio de la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche, Universidad Autónoma del estado de Morelos.

De este estudio se extrajo y digitalizó la información de detalle de la batimetría en el interior de Laguna de Términos (Fig. X.14); y frente a la costa de Isla del Carmen, hasta la batimétrica 6 m de profundidad (Fig. X.15), obtenida como resultado de muestreos en Julio de 2008.

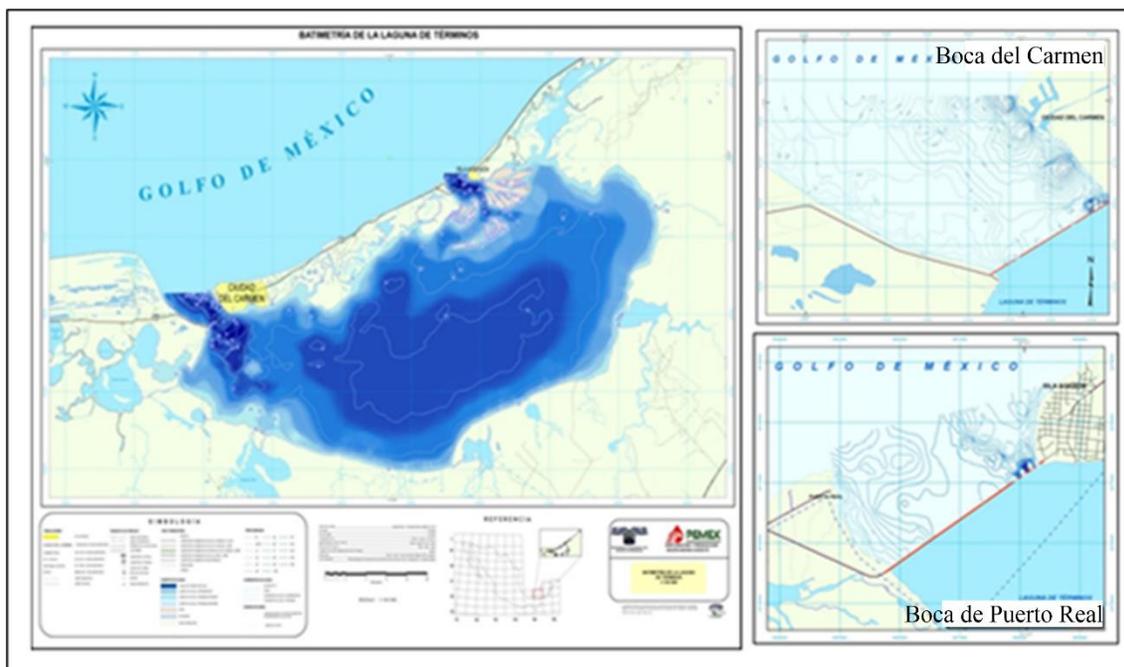


Figura X.14. Batimetría en Laguna de Términos.

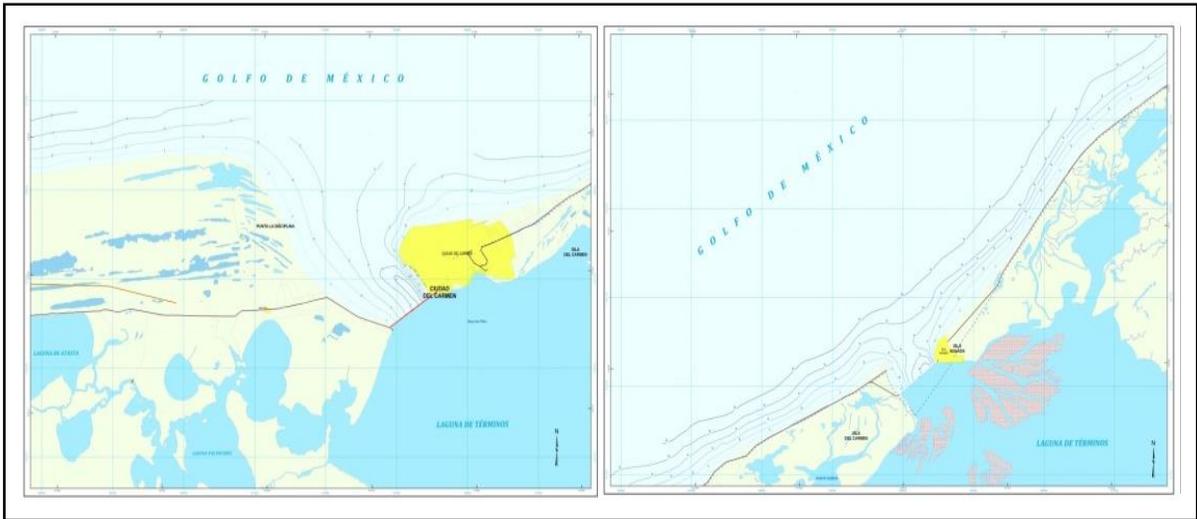


Figura X.15. Líneas batimétricas frente a la costa de Isla del Carmen (secas 2007).

(2) Carta Náutica 28260, Golfo de México-Barra Tupilco a Isla Piedra, año 1981

De esta Carta, se digitalizaron los datos de profundidad de profundidad de 6 a 20 m (Fig. X.16).

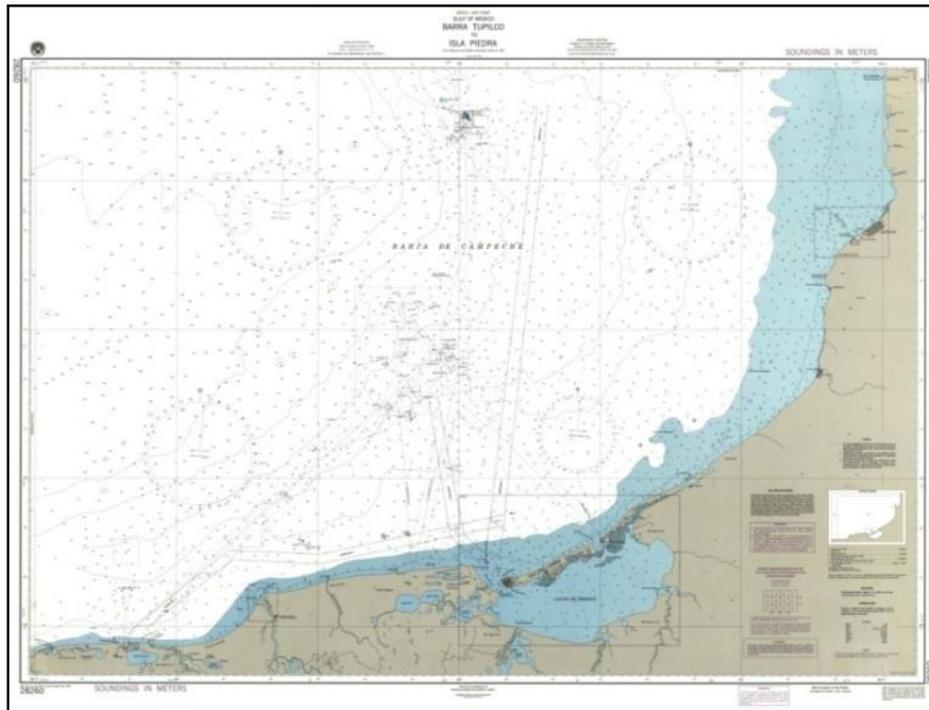


Figura X.16. Carta Náutica 28260, Golfo de México-Barra Tupilco a Isla Piedra (1981).

(3) Datos propios de campaña de campo

En Abril de 2012 se realizó una campaña de campo en Isla del Carmen donde, además de muestreos topográficos, se realizaron perfiles con estación total en 5 tramos del litoral de Isla del Carmen de 1-1.5 km de extensión, cada 100 m hasta una profundidad de 1.5 a 2 m. Estos datos fueron contrastados con el resto de información, y cuidadosamente analizados para la definición de la línea de costa.

El aspecto final de la batimetría, tras la interpolación de todos los datos, se muestra en la Fig. X.17.

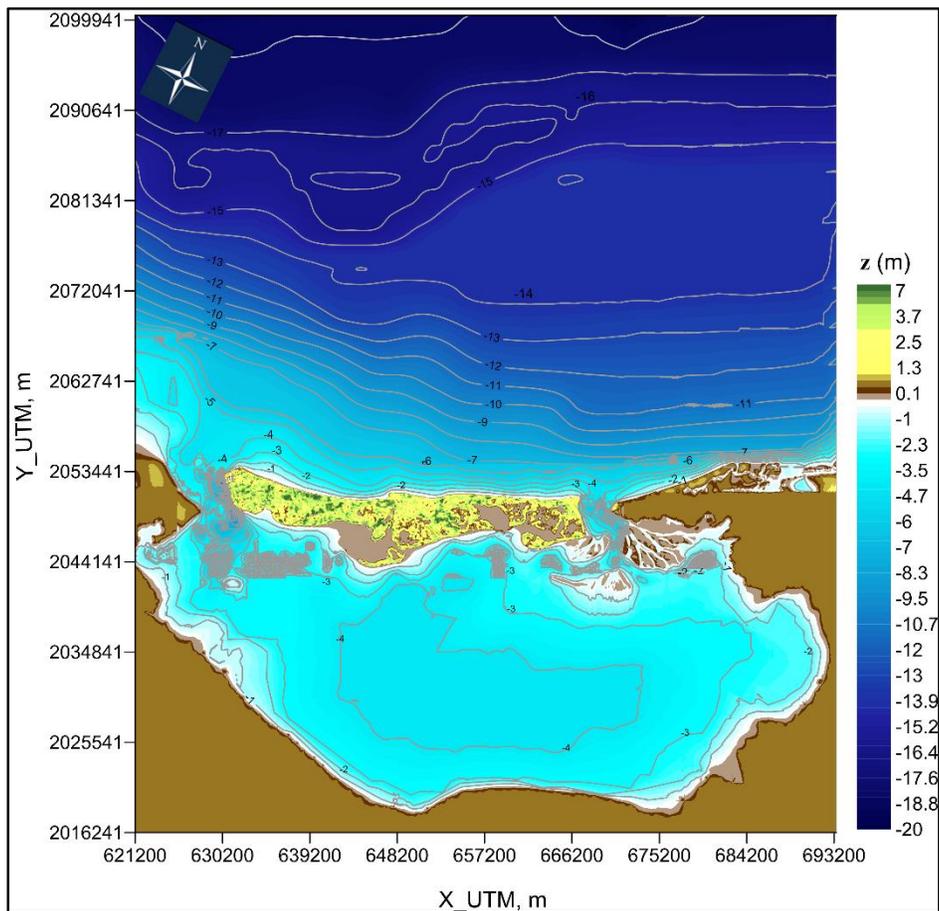


Figura X.17. Batimetría en Isla del Carmen.

La batimetría de la zona costera muestra pendientes inferiores de 3%, ligeramente inclinada de Este a Oeste (PDU, 2009) alcanzando una profundidad de 10 m a una distancia de 13 km de la línea de costa. En la laguna, la batimetría tiene una configuración bastante uniforme, con una profundidad media entre 2 y 4 m (Márquez et al., 2008).

X.3.2. Topografía

En campo (Abril de 2012), se tomaron muestras de la topografía de la playa en toda su extensión. Se utilizó principalmente GPS diferencial, cuyos transectos se muestran en la Fig. X.18; y escaneo láser 3D para profundizar el análisis en 3 zonas de interés (A1, A2 y A3 en la Fig. X.18). Los resultados del escaneo se muestran en la Fig. X.19.

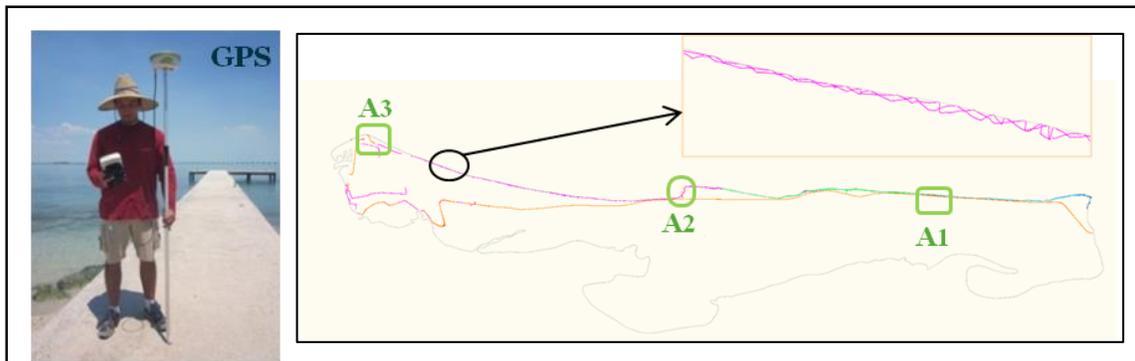


Figura X.18. Transectos realizados mediante GPS en Isla del Carmen, y ubicación de las zonas de escaneo láser 3D.

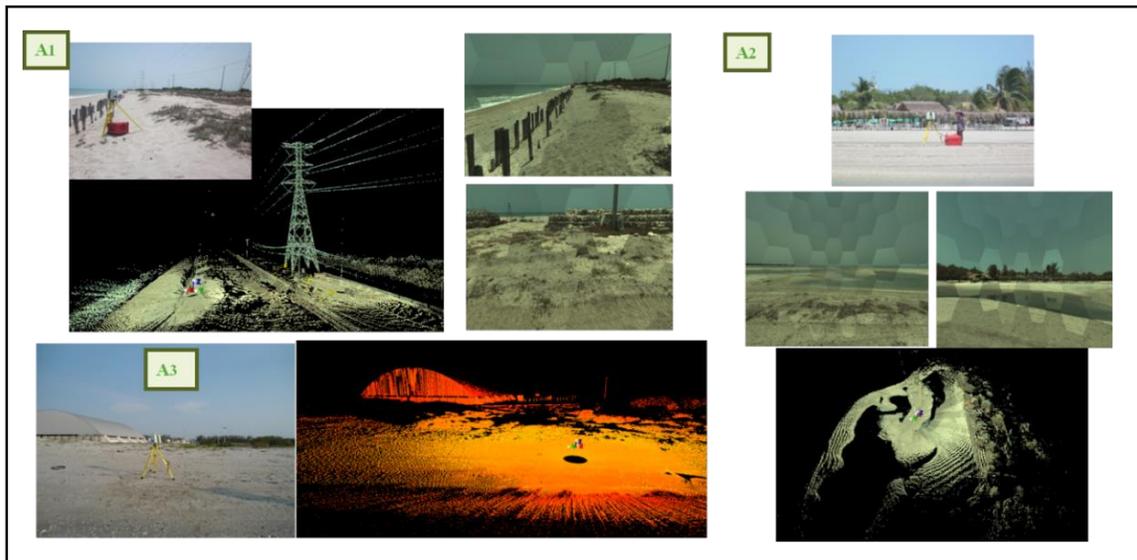


Figura X.19. Resultados de escaneo láser 3D en tres zonas seleccionadas en Isla del Carmen.

La topografía del resto de la Isla se complementó mediante topografía LiDAR (Light Detection And Ranging), proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

El resultado de la topografía queda reflejado en la Fig. X.20.

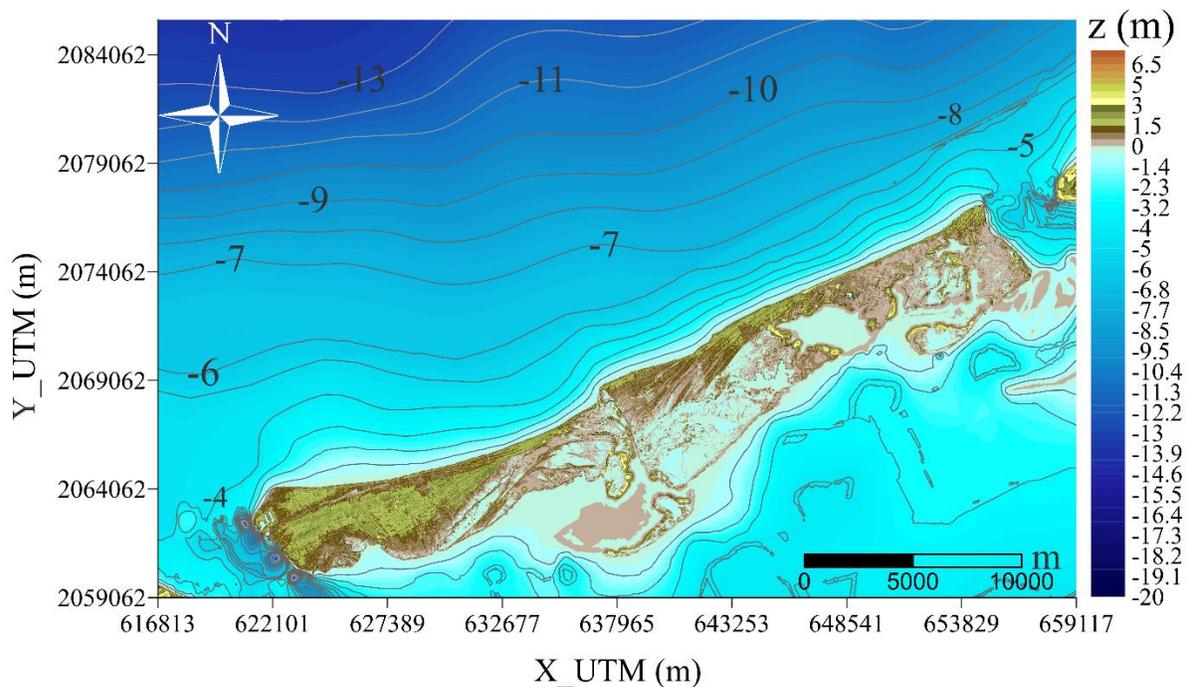


Figura X.20. Topografía en Isla del Carmen.

En general, la topografía en la Isla no tiene grandes elevaciones. En Ciudad del Carmen predomina una cota de 1 a 2 m; superficie por debajo de los 0.5 m y una pequeña extensión supera los 2 m. En el resto de la Isla, predomina una elevación de 0 a 3 m, una considerable superficie a nivel medio del mar o inferior y zonas muy localizadas con cota máxima de 7 m. La carretera que cruza la Isla tiene una elevación de 2 m (en la mitad oriental de la Isla, donde se extiende de forma paralela a la costa y próxima a la playa).

Una pequeña duna (con una cota máxima en torno a 2-3 m) se extiende longitudinalmente en gran parte del litoral. En la Fig. X.21 se muestra la localización de la duna, y su aspecto en algunos tramos.

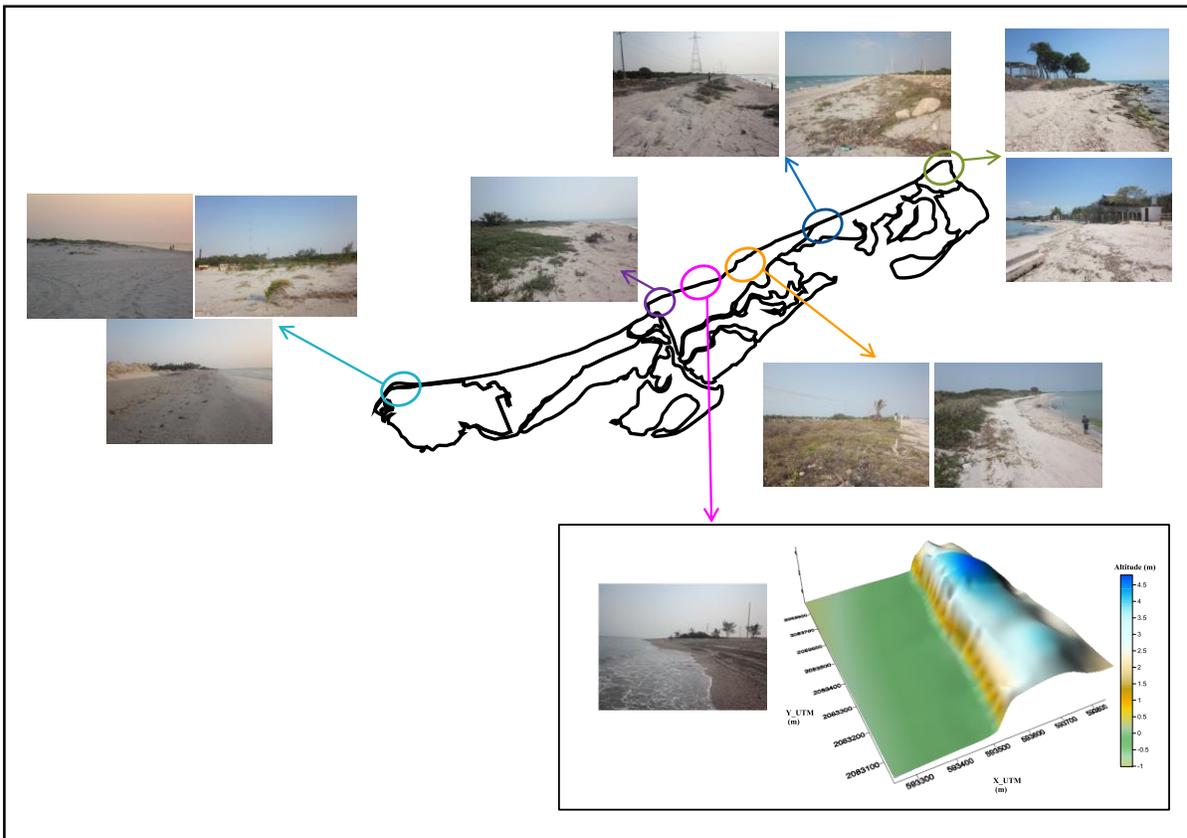


Figura X.21. Aspecto de la duna a lo largo de la costa de Isla del Carmen.

X.4. Caracterización de los sedimentos

Los sedimentos en el área se componen principalmente de arena, limo y arcillas finas de origen marino, lagunar y fluvial.

En la zona costera predomina la arena carbonatada con un volumen alto de materia orgánica y considerable cantidad de material biogénico (restos de almejas, caracoles y otros moluscos que viven en el área), distribuidos especialmente en la zona central de la isla. En la costa Este de Isla del Carmen domina el sedimento calcáreo procedente de la erosión de rocas; mientras que alrededor de la boca del Carmen se encuentra sedimento más fino de origen fluvial (sedimento terrígeno transportado por los ríos que desembocan en la laguna) (Fig. X.22).



Figura X.22. Origen de los sedimentos (modificado de Márquez A. et al., 2008).

Laguna de Términos se localiza en la confluencia de dos principales y altamente diferenciadas regiones fisiográficas, la Región del Golfo y la Península de Yucatán; lo que ocasiona una influencia hidrológica continental diferente en la diversas zonas de la laguna (Márquez et al., 2008). Las áreas central y oeste se encuentran dominadas por sedimento calcáreo, mientras que en la zona oriental abundan los sedimentos fangosos del drenaje de los ríos en esta área.

En la Fig. X.23 se indica el tamaño medio de sedimento, obtenido de muestras tomadas en las zonas de rompiente, swash y duna de varios perfiles transversales distribuidos en la playa, en Abril de 2012. El tamaño de sedimento, de acuerdo al parámetro d_{50} , varía de 0.17-0.9 mm, 0.16-0.85 mm, y 0.16-0.59 mm en zonas de rompiente, swash y duna, respectivamente. Se observa la presencia de arena más fina cerca de Ciudad del Carmen; de un sedimento grueso de la erosión de rocas, organismos calcáreos y material biogénico en la zona central; y de un sedimento grueso de la erosión de rocas en la zona oeste de la isla.

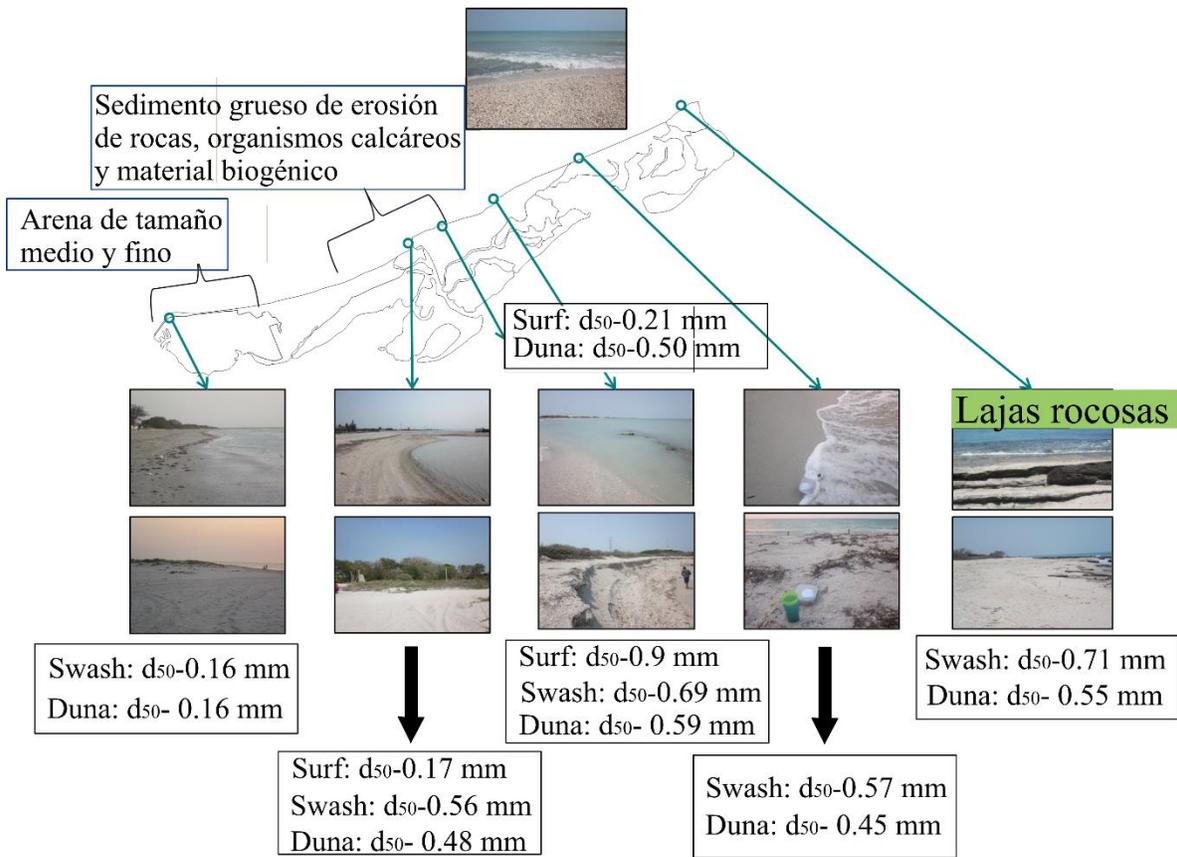


Figura X.23. Tamaño medio de sedimento d_{50} en la playa de Isla del Carmen.

El análisis del flujo de sedimentos, obtenido de datos tomados en campo en 2006 (Márquez et al., 2008) muestra un comportamiento similar en las dos bocas en estación de secas, pero diferente durante las estaciones de nortes y lluvias.

En la boca del Carmen (Fig. X.24a), el flujo va hacia dentro o hacia fuera de la laguna dependiendo de la estación del año; teniendo lugar la acumulación de sedimento durante la estación de nortes y pérdida durante lluvias y secas. Un flujo de sedimento de 20 t/s fue medido en estación de nortes, de 325 kg/s en estación de lluvias y de tan sólo 16 kg/s en estación de secas de 2006 (Márquez et al., 2008).

En la boca de Puerto Real (Fig. X.24b), el movimiento del flujo de agua y sedimento se dirige normalmente hacia la laguna; con un flujo de sedimento de 6.3 t/s, 21 kg/s y 5.2 t/s en nortes, lluvias y secas de 2006, respectivamente (Márquez et al., 2008). Debido a un efecto coanda parte del sedimento del interior de la laguna procedente del transporte litoral predominante (en sentido Este-Oeste) retrocede alcanzando el litoral de Isla del Carmen.

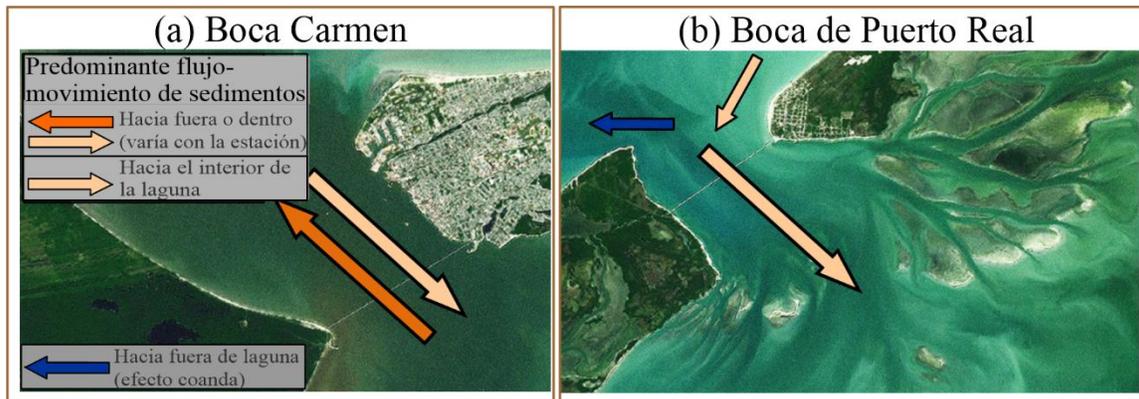


Figura X.24. Movimiento de sedimento y flujo predominante en las bocas de Laguna de Términos: (a) Boca del Carmen; (b) Boca de Puerto Real.

X.5. Patrón de circulación en la laguna

En condiciones de calma, la dinámica asociada con condiciones anticiclónicas en el Oeste del Golfo de México producen un flujo neto hacia la laguna por la boca de Puerto Real y un flujo hacia el afuera a través de la boca del Carmen; resultando en la formación de bancos de arena en la boca de Puerto Real y manteniendo los canales naturales estables en la boca del Carmen (PDU, 2009). Las corrientes del flujo en el interior de la laguna tienen una dirección hacia el oeste, como en la zona costera de Isla del Carmen. Debido al efecto coanda, mencionado anteriormente, tiene lugar un bypass natural del sedimento de transporte litoral predominante en sentido Este-Oeste en el extremo oriental de Isla del Carmen.

Durante un evento “norte”, resultados de modelado numérico (Márquez et al, 2008) muestran un flujo neto hacia el interior de la boca del Carmen, que reduce el flujo que entra a través de la boca de Puerto Real, produciendo una rotación anticiclónica en la parte Este de la laguna. Esta rotación anticiclónica se mueve hacia el Este y disminuye con el incremento de la velocidad del viento. Las corrientes en la laguna van de Oeste a Este. Cuando la intensidad de los vientos disminuyen, se restaura el flujo predominante que se mueve hacia el oeste (Márquez et al., 2008).

X.6. Análisis de la configuración morfológica de Isla del Carmen

La información contenida en el artículo Palacio et al., 1999, sobre los efectos del huracán Roxanne en Isla del Carmen, despertó el interés en el análisis de la evolución de la configuración geomorfológica de la Isla y se recopilieron algunas imágenes de mapas antiguos de la página proporcionada por la mapoteca del servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (<http://www.siap.gob.mx/mapotecasiap/>). Esta información fue considerada útil para mejorar el entendimiento de la dinámica en la Isla y proponer medidas de mitigación del riesgo más acertadas. En la Fig. X.25 se muestran algunos de estos mapas.

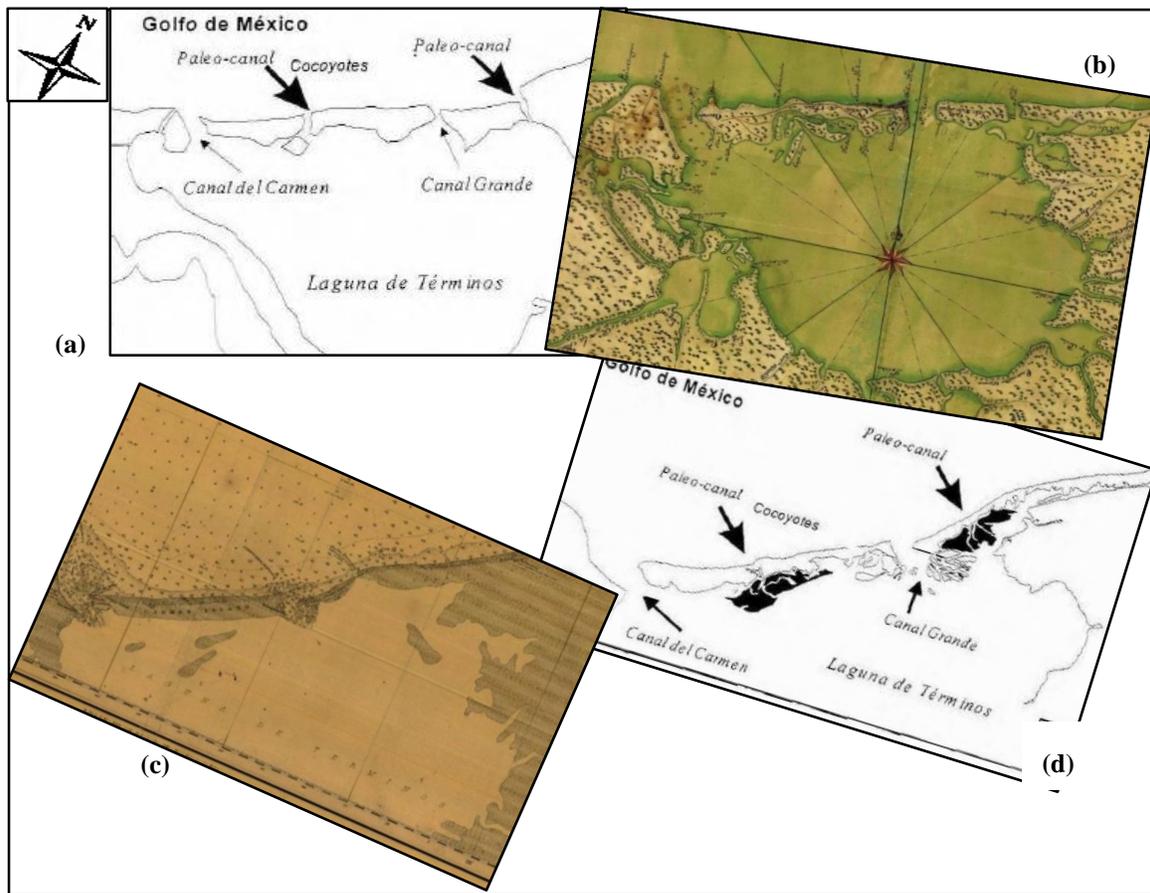


Figura X.25. Mapas antiguos de Isla del Carmen: (a) Configuración de la línea de costa en 1756; (b) Configuración de la línea de costa en 1763; (c) Configuración de la línea de costa en 1852; (d) Configuración actual de la línea de costa.

X.7. Historia de erosión

La historia de erosión se analizó mediante fotografía aérea e imágenes satelitales disponibles en el periodo de 1985 a 2012. En total se disponía de 30 fotos aéreas que abarcaban parte o la superficie total de Isla del Carmen en 1985, 1990, 1994, 2002, 2005 y 2008; e imágenes satelitales de 2012 y 2013. La Tabla X.3 incluye la disponibilidad de datos en cada fecha, fuente y cobertura (en términos de extensión de la línea de costa). La evolución de la costa se analizó hasta 2012 debido a la reducida cobertura de la imagen de 2013.

Fecha	Tipo de imagen	Fuente de datos	Cobertura de costa (%)
1985 (Mar)	Foto aérea	INEGI	79.7 (PK 0-22.9; 28.5-33.5)
1990 (Mar)	Foto aérea	INEGI	91.4 (PK 0-12.0; 15.3-33.5)
1994 (Mar)	Foto aérea	INEGI	100
2002 (Ene)	Foto aérea	INEGI	100
2005 (Feb)	Foto aérea	INEGI	100
2008 (Feb)	Foto aérea	INEGI	100
2012 (Abr)	Foto aérea	digitalglobe	38.9 (PK 0-13.6)
2012 (Sept)	Imagen satelital	digitalglobe	53.3 (PK 14.5-31.9)
2013 (May)	Imagen satelital	digitalglobe	4.8 (PK 31.9-33.5)

Tabla X.3. Datos disponibles de fotos aéreas e imágenes satelitales en Isla del Carmen (Instituto Nacional de Estadística y Geografía-INEGI).

La información proporcionada por estas fuentes fue complementada con información útil de *google earth* correspondiente a los años 2007, 2009 y 2011, que no había sido encontrada en las imágenes satelitales de *digitalglobe* ni en las fotos aéreas.

Las fotos aéreas fueron georreferenciadas en ArcMap y unidas en esta plataforma con las imágenes satelitales para montar el mosaico de fotos e imágenes en cada periodo (Fig. X.26).

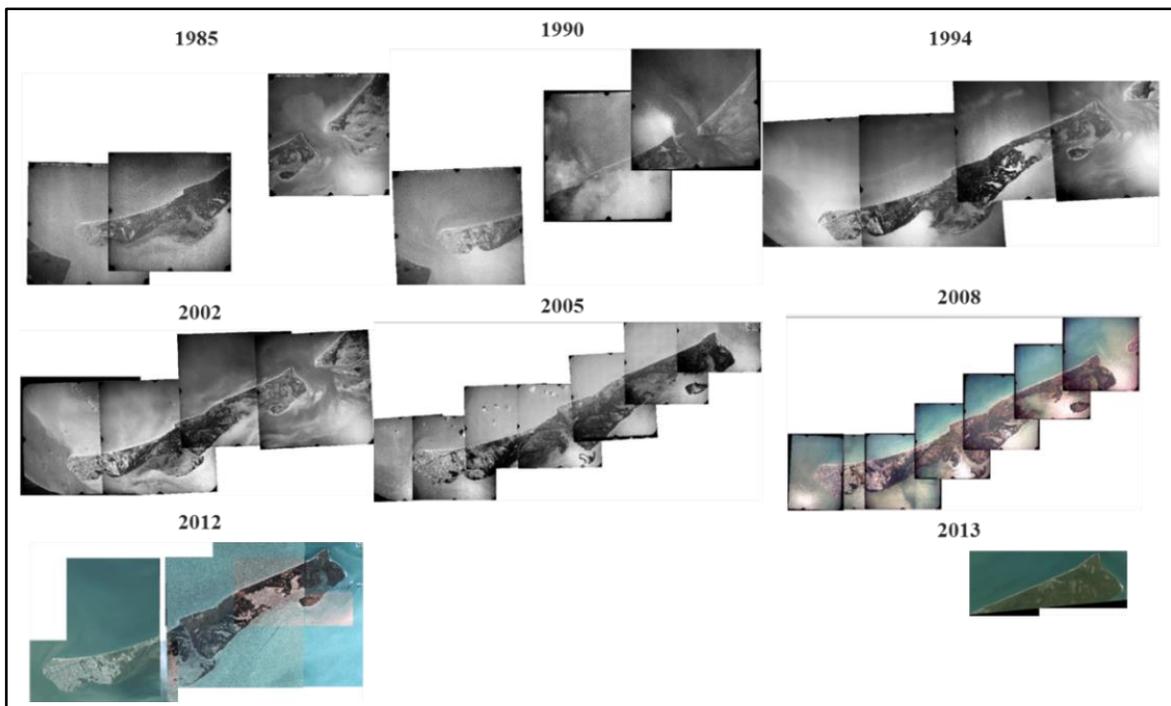


Figura X.26. Mosaicos de fotos aéreas e imágenes satelitales para estudio de evolución de línea de costa, de 1985 a 2012.

Posteriormente, se digitalizó la línea de costa en cada año y se comparó su posición en los distintos periodos, estableciendo tasas de erosión o acreción por periodos a lo largo de toda la costa de Isla del Carmen.

En la Fig. X.27 se muestra la ubicación de los perfiles de playa donde se analizó la evolución de la costa, y las playas más populares en Isla del Carmen (en rojo y azul, respectivamente). En el eje de abscisas de la Fig. X.22 la línea PK, paralela al eje X, indica el kilómetro medido de oeste a este respecto al Punto considerado como referencia, PK 0; tomado como referencia para localizar más fácilmente lugares en la playa y entender la dinámica de la isla. PK 0 fue tomado en el punto de coordenadas X_UTM (15N WGS84) 621310.3 m. La posición de la línea de costa se extrajo en perfiles cada 500 m, en algunos ubicados en las áreas consideradas de interés y se descartaron aquéllos donde no se disponía de imagen para comparar.

En cuanto a la representatividad de la línea de costa digitalizada, no se consideraron posibles errores debido al incremento del nivel del mar por marea astronómica.

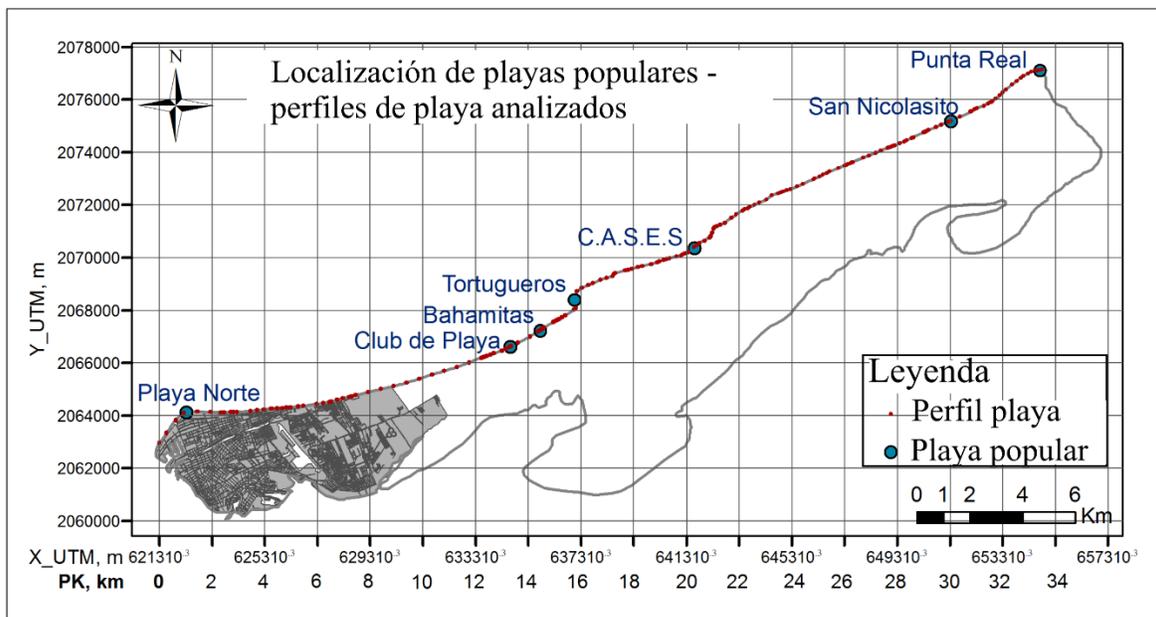


Figura X.27. Localización de las playas más populares, y perfiles de playa analizados en Isla del Carmen.

Existen evidencias de que los primeros reportes de erosión costera en Isla del Carmen aparecieron en los años 70's pero fueron ignorados (Márquez et al., 2008, en www.periodistasenlinea.org). En el periodo de 1970 a 1980 tuvo lugar un retroceso severo de la línea de costa, con una erosión máxima de 180-210 m, en el cual el huracán Brenda pudo ser uno de las causas por su paso del 18 al 22 de Agosto de 1973, generando olas de hasta 7.8 m y periodo pico de 10.8 s (a 28 m de profundidad según la base de datos de oleaje), y una sobreelevación del nivel del mar considerable por marea de tormenta. Parte de la

erosión producida en ese periodo se recuperó en 1982, tras la construcción de varias estructuras de protección.

El análisis de las fotografías aéreas y las imágenes satelitales en el periodo de 1985 a 2012 mostró erosión en una extensa longitud de la playa. La Fig. X.28a. representa la evolución de 1985 a 2012; y la Fig. X.28b de 1990 a 2012, para analizar en el periodo de tiempo más largo disponible los tramos donde no se disponía de la posición de la costa en 1985 (Tabla X.3).

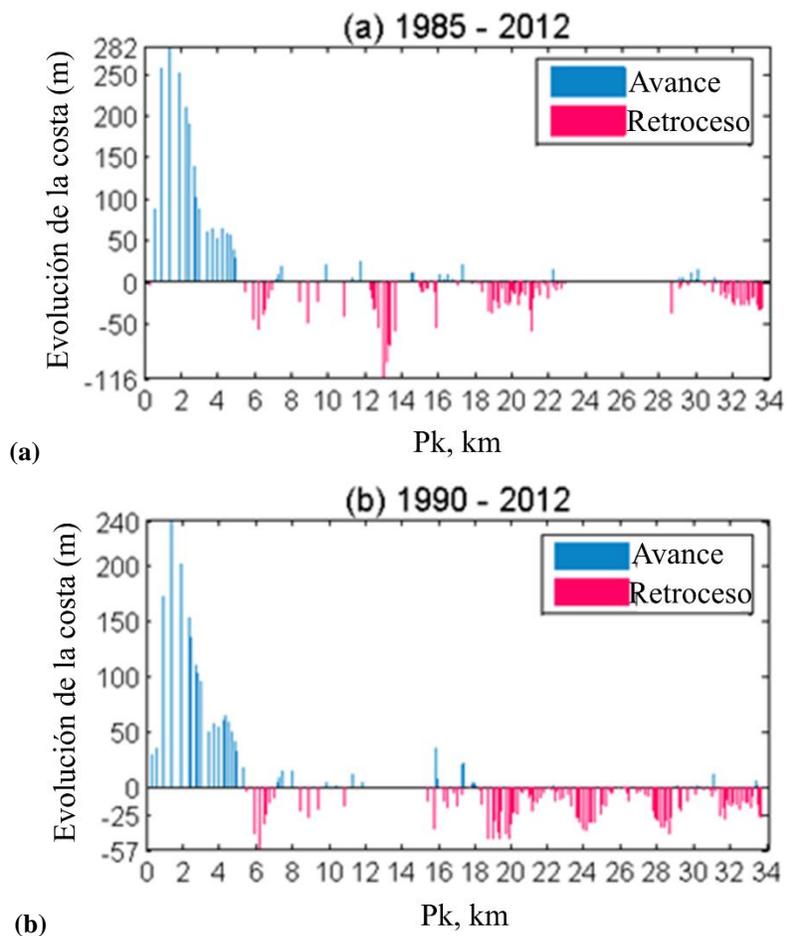


Figura X.28. Evolución de la costa: (a) 1985–2012; (b) 1990-2012.

El análisis de la tasa de cambio de la costa en los seis periodos intermedios, en Fig. X.29, permite destacar los periodos y las secciones de playa donde se produjo un mayor retrceso.

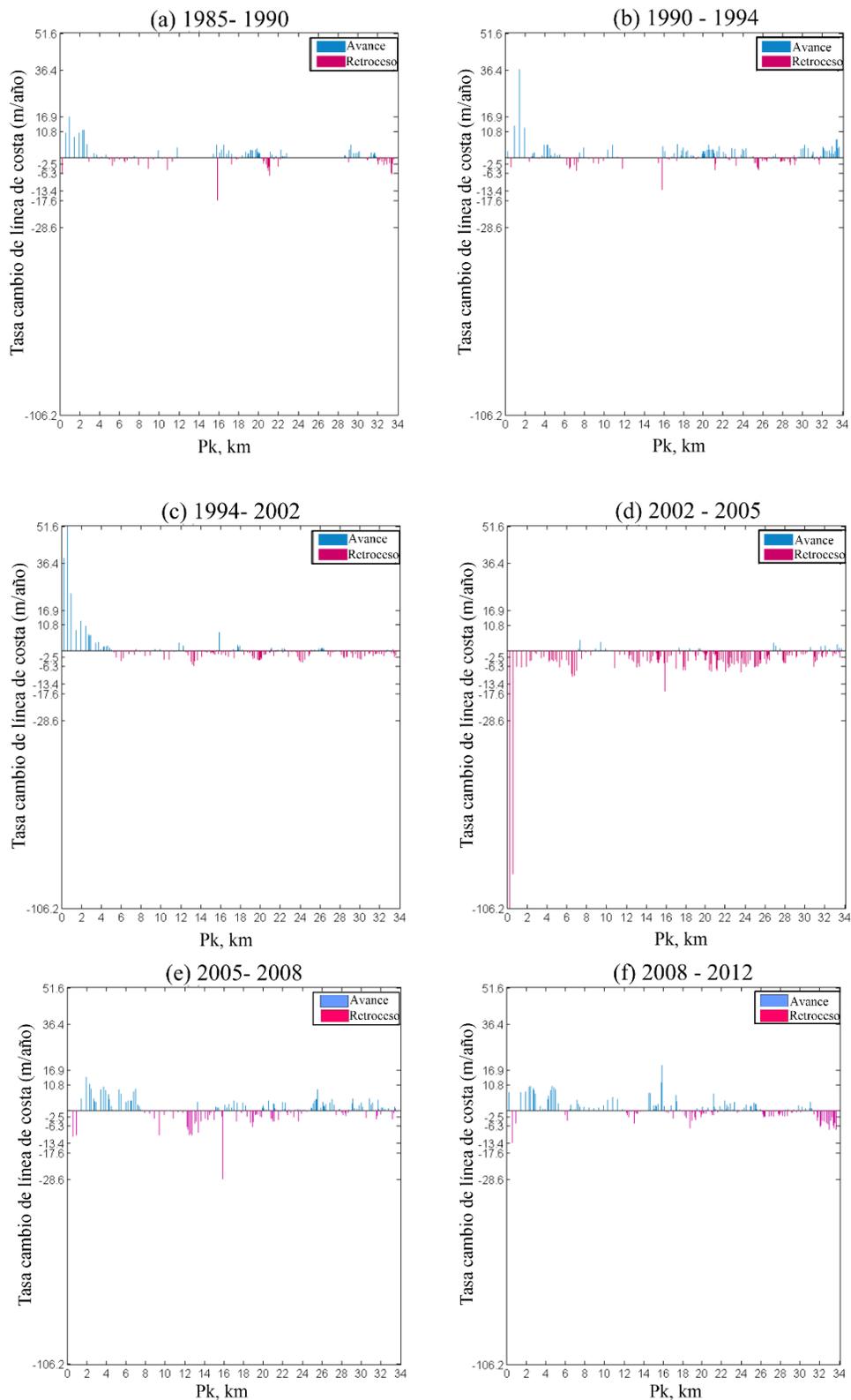


Figura X.29. Tasa de cambio de la línea de costa de 1985 a 2012: (a) 1985-1990; (b) 1990-1994; (c) 1994-2002; (d) 2002-2005; (e) 2005-2008; (f) 2008-2012.

En las Tablas X.4 y X.5 se incluye el desplazamiento medio (en transversal) de la línea de costa y la tasa de cambio de la costa, en varios segmentos y los diferentes periodos analizados.

PK	Playa	Desplazamiento medio de la línea de costa					
		1985 1990	1990 1994	1994 2002	2002 2005	2005 2008	2008 2012
6.2		-0.3	-11.3	-23.1	-17.4	12.2	-16.7
8.8		-22.2	-8.2	-15.1	3.0	-10.0	3.2
10.8		-24.5	20.7	-27.8	-20.9	-9.9	21.7
13	Club de Playa	-	-	-34.7	-20.1	-15.7	-20.7
13.1	Club de Playa	-	-	-43.8	-14.9	-13.0	-4.0
13.3		-	-	-50.8	-19.2	-27.0	-4.9
15.8	Tortugeros	-88.3	19.3	61.6	-49.8	-85.8	75.7
18.3		5.1	12.4	-12.6	2.9	-6.7	-11.6
18.7		11.1	3.8	-5.5	-0.8	-14.7	-29.1
19.8		19.2	5.6	-30.6	-3.6	-7.6	-10.5
21	C.A.S.E.S	-37.0	-20.6	11.6	-22.3	-13.6	-7.6
23.8		-	14.1	-31.2	-15.7	-3.8	-0.9
24.4		-	-0.5	-27.9	-11.3	-0.9	9.4
28.6		4.3	-7.6	-19.3	-5.0	-2.4	-7.9
31.5		8.5	-9.5	-9.0	-5.8	-10.7	-0.7
33.4	Punta Real	-6.8	15.6	-18.3	-5.3	2.4	-20.3
33.5	Punta Real	-3.3	18.2	-15.0	2.8	-0.8	-32.1

Tabla X.4. Cambio medio de la línea de costa en varios tramos de la costa de Isla del Carmen (los valores en rojo corresponden a valores de erosión media máxima en cada periodo. Un valor positivo indica acumulación de sedimento).

PK	Playa	Tasa de cambio de la línea de costa (m/año)					
		1985 1990	1990 1994	1994 2002	2002 2005	2005 2008	2008 2012
6.2		-0.1	-2.8	-2.9	-5.8	4.1	-4.2
8.8		-4.4	-2.1	-1.9	1.0	-3.3	0.8
10.8		-4.9	5.2	-3.5	-7.0	-3.3	5.4
13	Club de Playa	-	-	-4.3	-6.7	-5.2	-5.2
13.1	Club de Playa	-	-	-5.5	-5.0	-4.3	-1.0
13.3		-	-	-6.4	-6.4	-9.0	-1.2
15.8	Tortugeros	-17.7	4.8	7.7	-16.6	-28.6	18.9
18.3		1.0	3.1	-1.6	1.0	-2.2	-2.9
18.7		2.2	1.0	-0.7	-0.3	-4.9	-7.3
19.8		3.8	1.4	-3.8	-1.2	-2.5	-2.6
21	C.A.S.E.S	-7.4	-5.2	1.5	-7.4	-4.5	-1.9
23.8		-	3.5	-3.9	-5.2	-1.3	-0.2
24.4		-	-0.1	-3.5	-3.8	-0.3	2.4
28.6		0.9	-1.9	-2.4	-1.7	-0.8	-2.0
31.5		1.7	-2.4	-1.1	-1.9	-3.6	-0.2
33.4	Punta Real	-1.4	3.9	-2.3	-1.8	0.8	-5.1
33.5	Punta Real	-0.7	4.6	-1.9	0.9	-0.3	-8.0

Tabla X.5. Tasa de cambio de la línea de costa en varios tramos de la costa de Isla del Carmen (los valores en rojo corresponden a la tasa de erosión máxima en cada periodo. Un valor positivo indica acumulación de sedimento).

De la Fig. X.30, se observa que las secciones de la playa que experimentaron una erosión más severa con el tiempo son las ubicadas alrededor del PK 6, 13.1 (Club de Playa), 15.8 (Playa Tortugeros), 21 (Playa Centro de Adiestramiento en Seguridad, Ecología y Supervivencia (C.A.S.E.S), 24, 28.5, 31, 33.4 (Playa Punta Real).

El análisis del cambio medio y tasa media de cambio de la línea de costa en los diferentes periodos y tramos mostraron como las zonas más críticas: Playa Club de Playa, Playa Tortugeros, Playa C.A.S.E.S y Playa de Punta Real.

Los mayores efectos se produjeron de 2005-2008, en Club de Playa y Playa Tortugeros; 1985-1990 y 2002-2005, en Playa C.A.S.E.S; y 2008-2012, en Playa Punta Real. Los mayores cambios de la línea de costa, en erosión, son PK 8.8, 10.8 PK, PK 13 (Club de Playa Beach), PK 15,8 (playa Tortugeros); PK 21 (playa de C.A.S.E.S), PK 28.5y PK 33.5 (playa Punta de Real). Por lo tanto, los tramos de la playa destacados de acuerdo al análisis de su historia de erosión son: PK 6, PK

8.8, PK 10.8, PK 13 y PK 13.1 (Club de Playa Beach), PK 15,8 (playa Tortugueros), PK 21 (playa de C.A.S.E.S), PK 24, PK 28.5, PK 31, PK 33.4 y PK 33.5 (playa de Punta Real).

La pérdida de material en playa Club de Playa, playa de C.A.S.E.S y playa de Punta Real coincide con los resultados del monitoreo (Márquez A. et al., 2008) de perfiles de playa en cinco periodos de análisis, de Agosto de 2005 a Junio de 2007 (en estaciones de secas, Nortes y lluvias).

Por otro lado, los cambios de la línea de costa relativos a la posición de la costa en 1985, en Fig. X.30a, (o en relación a la posición en 1990, en Fig. X.30b) permitieron identificar las secciones de la playa donde se registraron las mayores variaciones de la posición de la línea de costa en todo el periodo. Este análisis se consideró útil para detectar las secciones más críticas, donde aplicar un estudio más detallado.

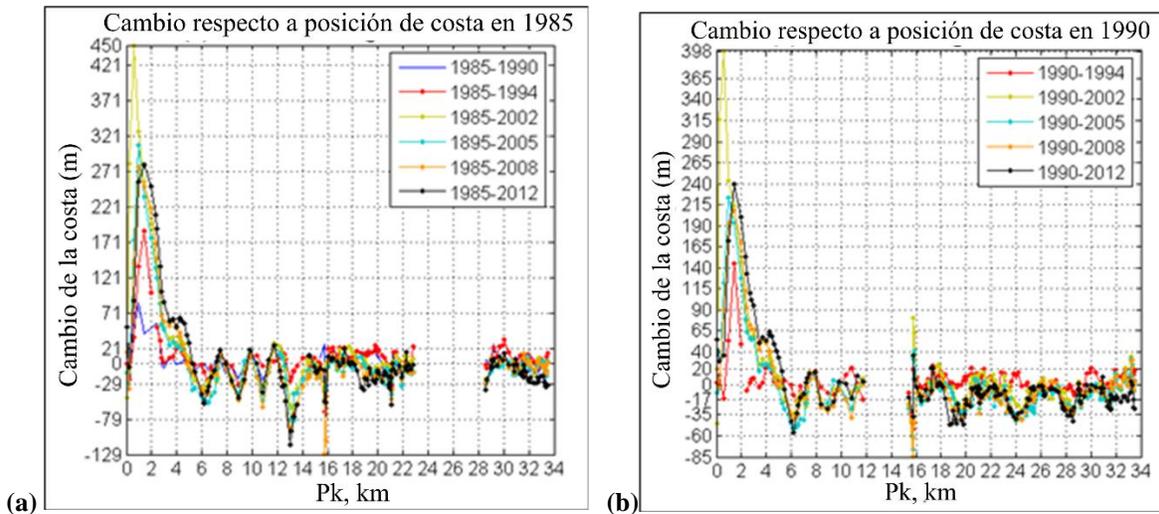


Figura X.30. Cambio de la línea de costa: (a) desde 1985; (b) desde 1990.

Destaca la gran variabilidad de los tramos de playa PK 0-2.9 (Playa Norte); PK 8.8; PK 10.8; PK 13 (Club de Playa); PK 15.8 (Playa Tortugueros); PK 21 (Playa C.A.S.E.S); PK 28.5; and PK 33.5 (Playa Punta Real).

X.8. Análisis de la evolución de histórica de playa Tortugueros

El estudio descrito en el apartado anterior permitió identificar un comportamiento cíclico de la evolución de la línea de costa en la playa Tortugueros (tramo con una extensión aproximada de 1 km), que se consideró interesante entender para evaluar el riesgo de erosión en esta zona. Para ello se utilizó información digitalizada de imágenes satelitales y fotos aéreas en un periodo de 28 años, de 1985 a 2013; con un total de 15 posiciones de línea de costa (14 periodos de tiempo no-homogéneos), Fig X.31.

Se identificaron cambios morfológicos anuales e interanuales, con tasas de acreción y erosión de hasta 160 m/año y 196 m/año, respectivamente, en torno a tres posiciones

generales del spit en el periodo de análisis (Fig. X.32). La distancia (en perpendicular) entre las posiciones más extremas fue de alrededor 164 m, de las cuales 90 m separaban las localizaciones intermedia y la situada más cerca de la playa.

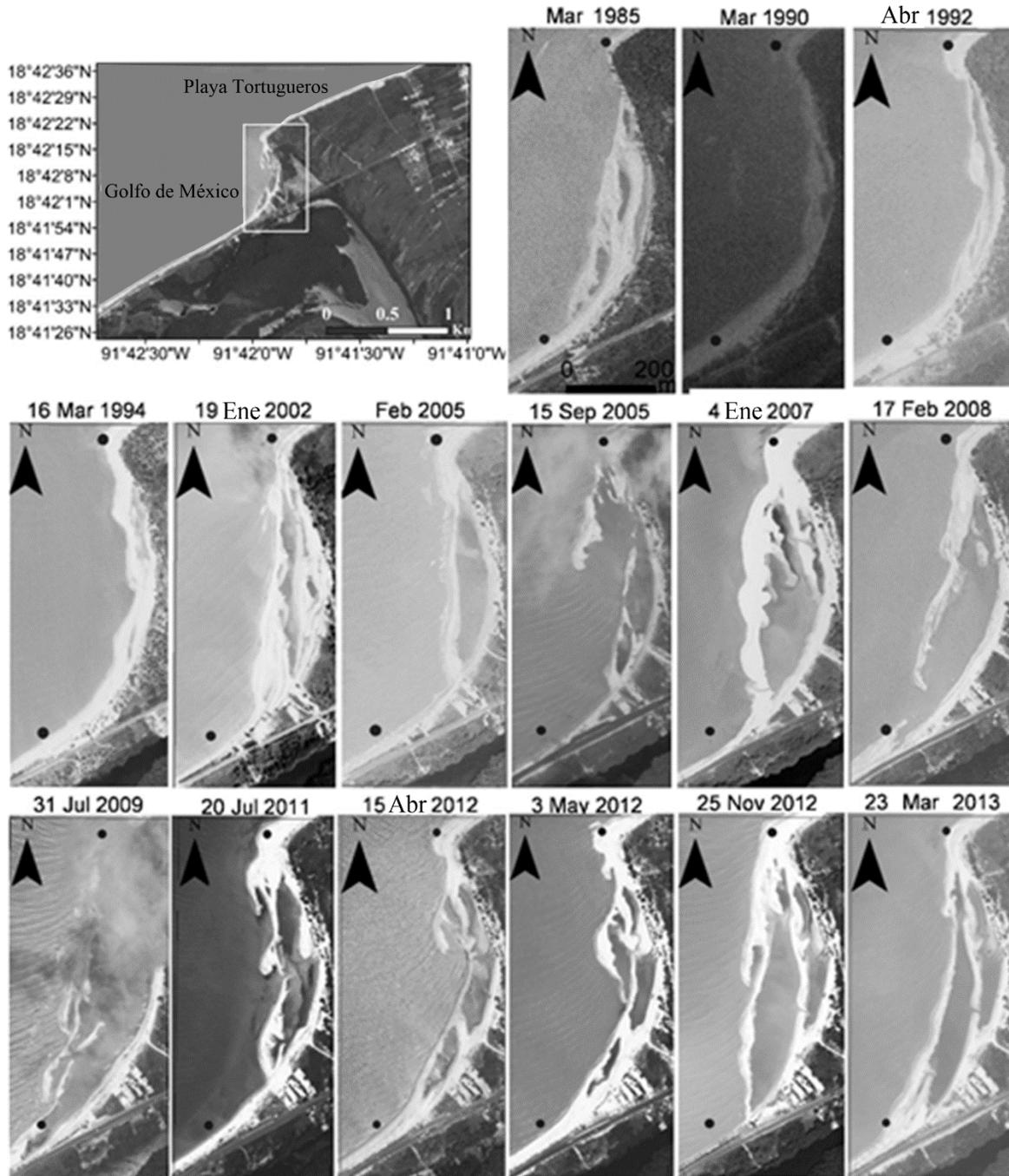


Fig. X.31. Evolución morfológica de playa Tortugeros de 1985 a 2013. Se producen cambios muy rápidos de posición y tamaño de las barras y spits en el tiempo, con posterior cambio a gran escala del ancho de la playa. Los puntos negros indican puntos de referencia en todas las fotografías.

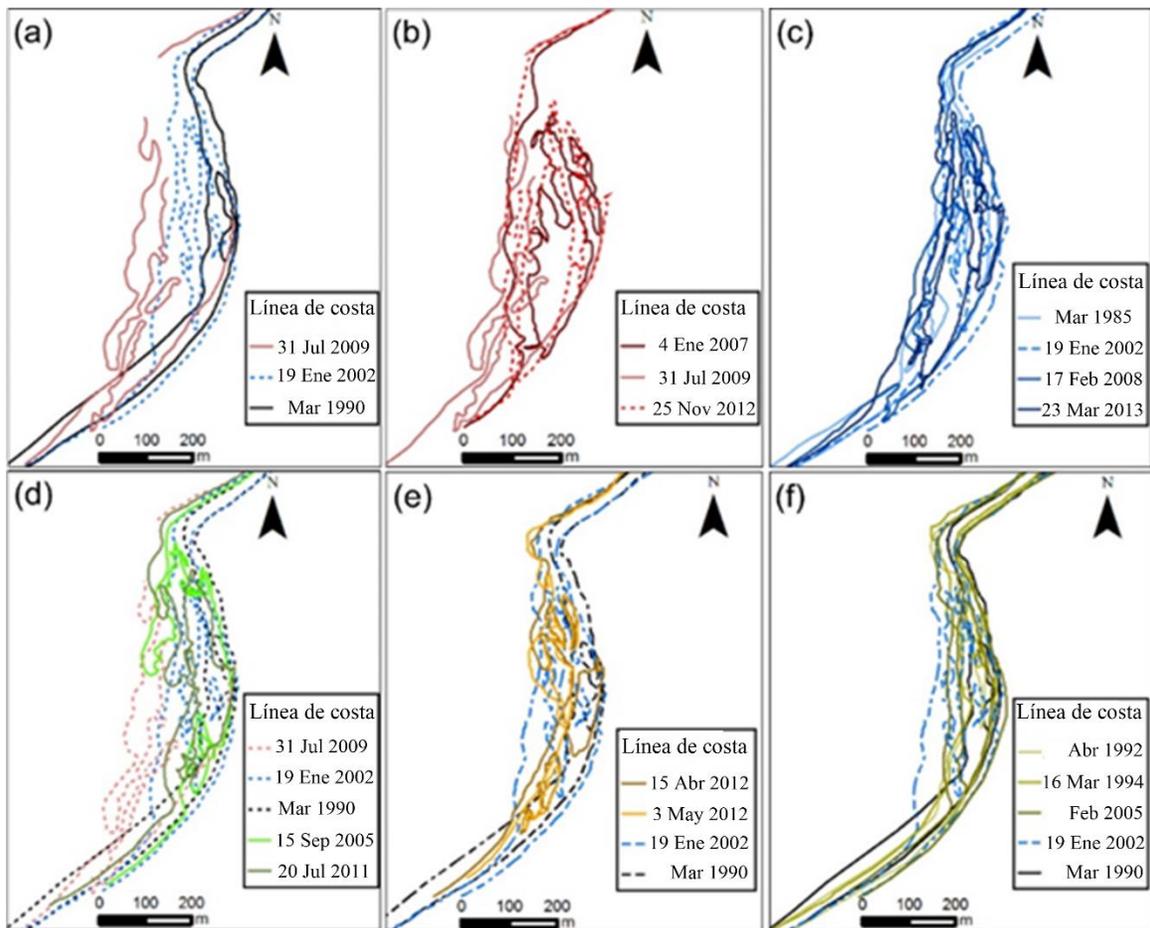


Fig. X.32. Identificación de localización de la barra spit en distintos momentos: (a) Tres localizaciones generales de la playa spit; (b) Tres líneas de costa más alejadas de tierra; (c) Cuatro líneas de costa en posición de playa intermedia; (d) Dos líneas de costa con la forma más avanzada en la sección norte, y una posición más erosionada respecto a la localización intermedia en el tramo sur; (e) Dos líneas de costa con una localización intermedia en las secciones norte, y una configuración más erosionada en los tramos sur; (f) Tres configuraciones de playa entre la forma intermedia y la situada más hacia tierra.

El desplazamiento observado de la línea de costa se relacionó con la dinámica del oleaje mediante modelación numérica. Para ello, se estimaron las condiciones de rotura del oleaje en las proximidades de la playa, se evaluó el flujo de energía del oleaje (en componentes longitudinal y transversal), y se comparó la distribución de energía a lo largo de la playa con las características del oleaje propagado desde aguas profundas y la evolución (en transversal y longitudinal) del spit. El desplazamiento en transversal de la costa se relacionó con la componente transversal del flujo de energía promediado en el tiempo.

La relación entre las condiciones de oleaje simuladas y la distribución del flujo de energía del oleaje (componente transversal) en la playa mostró las siguientes conclusiones:

- Los eventos “Norte”, con dirección procedente del sector Oeste-Noroeste a Norte-Noroeste, y en algunos casos con pequeño ángulo (2°); olas de altura inferior a 1 m (clase calma) de dirección Norte: producen distribución alta de energía en toda la playa.
- Los eventos con altura de ola inferior a 1 m, en dirección Norte-Noreste y Norte: producen una concentración más alta de energía en el tramo mitad norte de la playa.
- Los eventos con olas de dirección Noreste: producen la llegada de energía del oleaje ligeramente más baja en la sección norte de la playa.
- Los eventos de altura de ola inferior a 1 m, en dirección procedente del primer cuadrante (11° a 45°): producen un avance general de la playa.

Los resultados del análisis mostraron que la playa Tortugueros es una playa dominada por el oleaje, en un sistema resiliente y en equilibrio dinámico.

El análisis de la zona contigua a la playa Tortugueros (PK 15.8), en Fig. X.33, mostró la existencia de proceso de erosión hacia el lado Este y Oeste; aunque en el Oeste la posición de la línea de costa en 2012 resultó ser similar a la existente en 1985, haciendo pensar que un cambio morfológico periódico podría estar teniendo lugar.

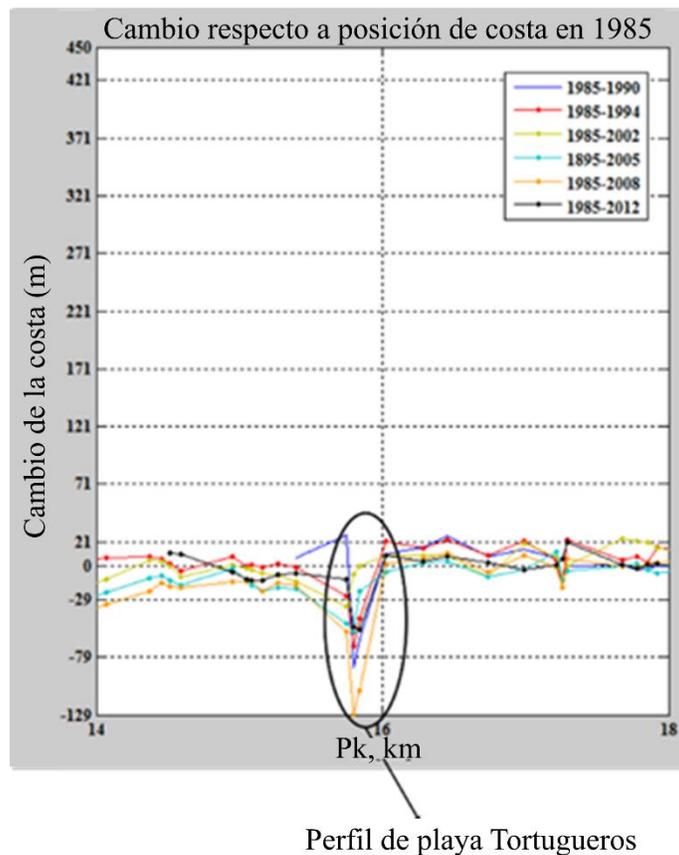


Figura X.33. Cambio de línea de costa en las inmediaciones de la playa Tortugueros.

X.9. Intervención humana

La intervención humana en Isla del Carmen consiste principalmente en la construcción de estructuras de protección (espigones; gaviones de escollera, a lo largo de la costa y en el extremo más externo de la playa con el fin de proteger la carretera que cruza la Isla; rompeolas de escollera y troncos paralelos a la costa); muelles y sacos de geotextil; e infraestructura y edificios situados sobre la playa y sistema dunar (carretera y caminos, paseo marítimo, muros, barandillas, etc). El diseño de la mayoría de estas estructuras de protección se considera inadecuada y algunas de ellas han sido destruidas por tormentas (como puede verse en Fig. X.34). Otras fueron las responsables del incremento de la erosión zonas contiguas (como sacos de geotextil instalados en playa Club de Playa en 2009, cuya posición es todavía visible en la imagen de 2011, Fig. X.35). Además, la expansión y crecimiento de Ciudad del Carmen hacia la costa año tras año; la degradación de la vegetación costera; y las continuas operaciones de dragado en Playa Norte y, aunque en menor medida, en la boca de Puerto Real (justificadas con el objetivo de prevenir la sedimentación en Laguna de Términos y con ésta los cambios en el flujo natural de corrientes entre Laguna de Términos y el Golfo de México), contribuyeron a la alteración del equilibrio original del sistema lagunar-estuarino de Laguna de Términos y alrededores.



Figura X.34. Estructura de escollera en Isla del Carmen: (a) Rompeolas en playa Bahamitas (modificado de Bolongaro A. et al., 2007); (b) Muro de escollera en PK 27, para proteger la carretera que cruza la isla; (c) Restos de rompeolas en playa San Nicolasito (modificado de Bolongaro et al., 2007).

En la Fig. X.30, además de la falta de funcionalidad de los geotextiles instalados en 2009 en playa Club de Playa, se muestra la erosión que tuvo lugar tras la retirada del relleno de escollera (de 2005 a 2008) y el estado de erosión de la playa en 2012.



Figura X.35. Evolución de la línea de costa en playa Club de Playa.

De las fotos aéreas, también se identificó el desplazamiento de la carretera en el periodo de 1994 a 2002, tras el retroceso sufrido por la línea de costa en el tramo entre el PK 30.6 y PK 31.3 (Fig. X.36).

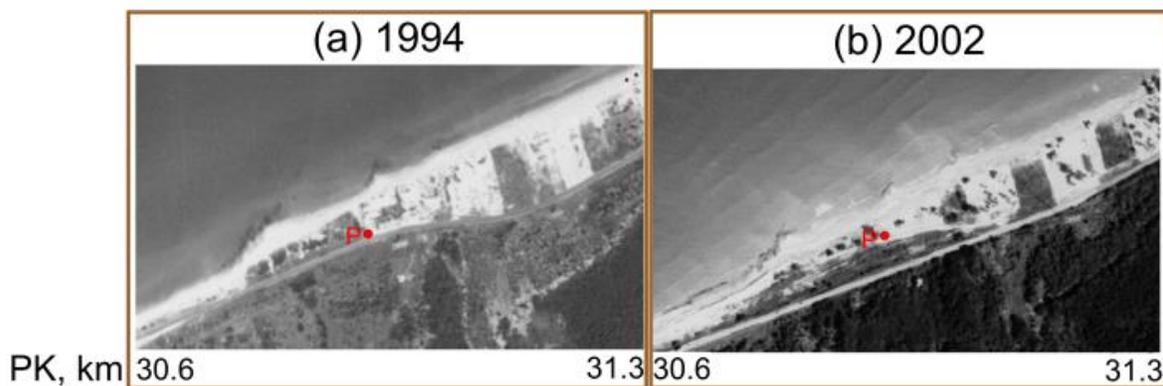


Figura X.36. Desplazamiento de la carretera de 1994 a 2002.

En la Tabla X.6 se incluyen las principales actividades que afectaron al flujo natural de sedimentos en el área desde 1928; y la Fig. X.37 muestra las estructuras de defensa que se identificaron mediante la observación de las fotografías aéreas y las imágenes satelitales en cada periodo.

Año	Actividades antropogénicas
1928	Ciudad del Carmen tiene solamente 1580 casas
40's	Construcción de muelles
	Construcción de carretera que cruza Isla del Carmen (<i>la altura del asfalto permite la recuperación de la erosión producida en periodo de lluvias</i>)
60's	Extensión de la construcción de muelles en la boca del Carmen (<i>transformación radical de Ciudad del Carmen</i>)
	Crecimiento de Ciudad del Carmen
70's	Renivelación de la carretera (<i>aumento en la altura del asfalto, el cual impide el intercambio de sedimento entre la laguna y el mar</i>)
	Construcción de presas en los principales ríos que desembocan en el área, lo que produce la retención de los sedimentos que llegan al mar
	El área urbana ocupa el doble de su expansión que en 1968
	Comienza la construcción del Puerto en Ciudad del Carmen
80's	Construcción de rompeolas y espigones, con troncos y escolleras
1982	Concluye la construcción del puerto
Sept 1988	Segunda renivelación de la carretera (<i>incremento en la altura y ancho de la calzada, lo que produce el bloqueo del transporte de sedimentos en el interior del sistema</i>)
90's	Construcción de varias estructuras de protección
2009	Instalación de sacos geotextiles rellenos de arena como rompeolas, a lo largo de 1000 metros de playa en Club de Playa

Tabla X.6. Principales actividades antropogénicas en Isla del Carmen desde 1928 (Bolongaro et al., 2007; PDU, 2009).

En 2002, se puede observar el esparcimiento material rocoso de las estructuras instaladas en gran parte de la playa (Fig. X.37d). En la actualidad, todavía hay restos de escollera y espigones enterrados en prácticamente toda la playa; particularmente visibles en los dos últimos kilómetros de la isla, junto a la boca de Puerto Real.

X.10. Relación entre historia de erosión, intervención humana y clima

El entendimiento de la evolución de la costa junto a la historia de la intervención humana y las características del clima facilitó la identificación de las causas de los actuales problemas de erosión en la zona costera de Isla del Carmen.

De 1985 a 1990, los escenarios más significantes de erosión se vincularon a la ubicación de estructuras de defensa mal diseñadas (espigones y diques exentos de escollera) a lo largo de la playa (Fig. X.37a).

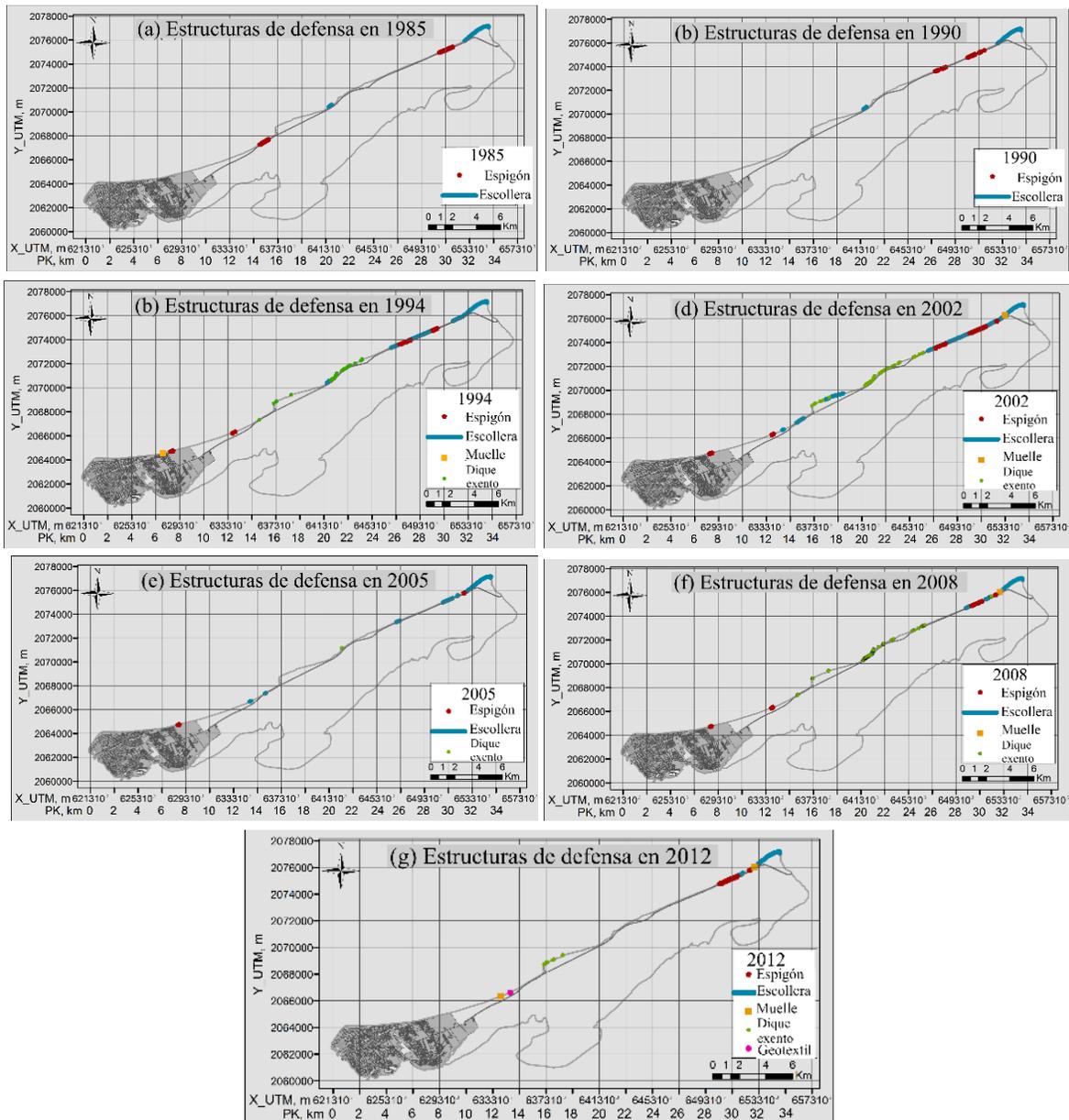


Figura X.37. Estructuras de defensa en la costa de Isla del Carmen: (a) en 1985; (b) en 1990; (c) en 1994; (d) en 2002; (e) en 2005; (f) en 2008; (g) en 2012.

De 1990 a 1994, se observa una mejor calidad de la playa que pudo deberse a la respuesta de la playa tras la construcción de varias estructuras de protección en los años 90 (la mayoría rompeolas de escollera, Fig. X.37b).

De 1994 a 2002, la construcción de nuevas estructuras de defensa en la unidad morfodinámica (Bologaro et al., 2007) dificultó la llegada de sedimento a la playa (espigones en la boca Sabancuy y otros a lo largo de casi toda la zona costera de Isla del Carmen); produciendo el retroceso general de la costa desde el PK 5.2 hacia la parte Este de la isla. Además, varios ciclones tropicales afectaron a la isla en este periodo (Huracán Opal,

Roxanne, Mitch y Keith). Otra de las consecuencias de la erosión en este periodo fue el desplazamiento de la carretera en PK 30.6-31.3 (junto a la playa).

De 2002 a 2005, se produjo un incremento de los procesos de erosión en todas las playas de Isla del Carmen. El Huracán Isidore, en 2002, ocasionó la generación de alturas de ola significativa de hasta 6.6 m durante una duración de 83 h.

Entre 2005 y 2008, la playa Club de Playa (en PK 13.3) se encontraba significativamente erosionada tras la retirada del relleno de escollera (Márquez et al., 2008), con un retroceso de 27 m. Los huracanes Stan y Dean afectaron el área, especialmente el huracán Dean con olas máximas de 8.6 m.

De 2008 a 2012, se produjo acumulación de sedimentos en varias áreas que previamente habían registrado erosión, aunque todavía con significativa erosión. En este periodo se instalaron diferentes estructuras de protección en un esfuerzo por resolver los problemas en Club de Playa; como rompeolas mediante sacos de geotextil (<http://www.axisingenieria.com.mx>), que no produjeron los resultados esperados.

BIBLIOGRAFÍA

Bolongaro, A., Torres, V., Márquez, A., 2007. Construcción y localización de estructuras en la línea de costa tramo Isla del Carmen-Chenkan Campeche, México. Memorias: resultados de la reunión del grupo de trabajo de la tortuga de carey en el Atlántico mexicano (Veracruz, México), 244p.

Márquez, A., Torres, V., Bolongaro, A., 2008. Estudio de la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche, *Universidad Autónoma del estado de Morelos*, 522p.

Palacio, J.L., Ortiz, M.A., Garrido, A., 1999. Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán “Roxanne”, *Investigaciones Geográficas*, 40, 48-57.

PDU., 2009. Actualización Programa Director Urbano del centro de población Ciudad del Carmen, Campeche: Por una Ciudad bella, competitiva, sustentable e incluyente, tomo 1, Antecedentes y diagnóstico, 158p.

Villalobos-Zapata, G.J. & Mendoza, J., 2010. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, México, 730p.

Yañez-Arancibia, A., Day, J.W., Lara-Domínguez, A.L., Sánchez-Gil, P., Villalobos, G.J. & Herrera-Silveira, J.A., 2005. Ecosystem functioning: the basis for sustainable

management of Terminos Lagoon, Campeche, Mexico, Xalapa, Veracruz, Mexico: *Instituto de Ecología, AC.*

<http://www.axisingenieria.com.mx>

<http://www.periodistasenlinea.org>

<http://www.siap.gob.mx/mapotecasiap/>