



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS**

**MORFODINÁMICA DE PLAYAS CARBONATADAS EN ISLAS DE
BARRERA: VULNERABILIDAD A LA EROSIÓN E
INDICADORES PARA EL MANEJO**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

ALFONSO CUEVAS JIMÉNEZ

TUTOR PRINCIPAL:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA. UNAM

DR. CARLOS ALEJANDRO ESCALANTE SANDOVA, FACULTAD DE INGENIERÍA. UNAM

DR. ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPÍA CINVESTAV, POSGRADO DE CIENCIAS DEL
MAR Y LIMNOLOGÍA.

DR. JORGE IVAN EUÁN ÁVILA, CINVESTAV POSGRADO DE CIENCIAS DEL MAR Y
LIMNOLOGÍA.

MÉXICO D.F. JUNIO DE 2014



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Carlos Alejandro Escalante Sandoval

Secretario: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Vocal: Dr. Rodolfo Silva Casarín

1^{er} Suplente: Dr. Ismael De Jesús Mariño Tapia

2^{do} Suplente: Dr. Jorge Iván Euán Avila

LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Mérida, Yucatán.

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, Ciudad Universitaria, D.F., México.

TUTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

FIRMA

Agradecimientos

A Betty, Bruno y Emilio, los motores de mi vida, por quienes todo esfuerzo vale la pena, por su inmensurable amor. A mi padre por su ejemplo, a mi madre por su amor y a mis hermanas por su constante impulso a la vida.

Un especial agradecimiento al Dr. Rodolfo Silva y al Dr. Jorge Euán por su generoso apoyo y su guía académica para que finalmente esta tesis culmine.

A los profesores Dr. Ismael Mariño, Dra. Maria de los Ángeles Liceaga y Dr. Eduardo Batllori, por sus importantes aportaciones. Al Dr. Capurro por ser el gran promotor de la oceanografía costera para el desarrollo sustentable. Asimismo, un agradecimiento a la Dra. Cecilia Enríquez por su apoyo en el procesado de los datos de perfiles y contribución en el análisis e interpretación de datos hidrodinámicos. Al Dr. Roger Orellana, quien impulsó el acceso y análisis a los datos de las estaciones meteorológicas.

A la Universidad Marista de Mérida, en particular al Dr. Juan Carlos Seijo, por el constante apoyo y motivación para concluir esta etapa de mi formación académica.

También es justo extender un agradecimiento a los técnicos y auxiliares de investigación, y estudiantes tesistas del CINVESTAV, Unidad Mérida que colaboraron, al igual que a los compañeros estudiantes del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su ayuda y colaboración.

Este estudio fue posible gracias al apoyo de los proyectos de investigación científica llevados a cabo en el CINVESTAV, Unidad Mérida: Erosión Costera y Calidad del Agua; Geomorfología en Islas de Barrera; Indicadores Ecológicos, y; Programa de Ordenamiento Territorial Costero de Yucatán.

Resumen

Tipificar las playas considerando sus características morfodinámicas brinda al manejo de playas muchas facilidades. Las características espacio-temporales en playas permiten establecer lineamientos para reducir riesgos y costos, y aumentar la seguridad de personas y bienes. En la costa norte de la Península de Yucatán, el problema de erosión de playa se ha manifestado de manera preocupante, afectando las propiedades próximas a la línea de costa. Este problema cobra gran importancia por la vocación turística y recreativa de la zona, así como por el alto grado de urbanización que presentan algunas porciones costeras aunado al manejo improvisado. Entre las acciones de defensa más utilizadas en la región se encuentran la construcción de espigones y rompeolas y recientemente se ha experimentado con la alimentación de playas, pero los escasos estudios previos sobre la dinámica de playas dominadas por arenas carbonatadas de origen biológico ponen en riesgo estos sistemas. Este estudio caracterizó la geomorfología de una porción de playa empleando percepción remota así como análisis de los cambios en perfiles topobatimétricos con el fin de identificar las zonas de mayor vulnerabilidad. También se estudiaron descriptores granulométricos e hidrodinámicos y se aplicó un análisis de morfodinámica de playas para tipificar el comportamiento de la zona de swash, revisando su variabilidad en el tiempo y a lo largo de la costa. Se analizaron perfiles topo-batimétricos, granulometría, oleaje, así como el parámetro de forma A del modelo de Dean, cambios en la línea de costa y el parámetro adimensional de velocidad de asentamiento (Ω). Se observó que la pendiente en la zona de swash es en general mayor durante la temporada de ondas tropicales y menor durante la de nortes. Los valores de Ω tipificaron playas intermedias con tendencia a reflectivas. El movimiento de la línea de costa en relación con el ancho de la playa, muestra diferentes niveles de seguridad a su entorno socioeconómico. Finalmente se logró identificar las zonas de mayor vulnerabilidad a la erosión para ser atendidas de manera prioritaria.

Palabras clave: Morfodinámica de playas, Geomorfología de playas, Perfiles de playa, Omega, Playas carbonatadas.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
Agradecimientos	i
Resumen	ii
Contenido	iii
Lista de figuras	v
Lista de tablas	x
CÁPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Playas	1
1.2 Erosión de playas	3
1.3 Morfodinámica de playas	5
1.4 Planteamiento del problema	7
1.5 Hipótesis de trabajo	10
1.6 Objetivo general	11
1.7 Objetivos específicos	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Geomorfología costera y morfodinámica de playas.....	15
2.2 Agentes de transporte sedimentario	17
2.3 Modelos de evolución de playas.....	22
2.4 Herramientas geoespaciales	23
2.5 Tipificación geomorfológica	24
2.6 Área de estudio y antecedentes	27
CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO	30
3.1 Geomorfología de playas	31
3.1.1 Descripción de playas por teledetección	31
3.1.2 Perfiles de playa	38
3.1.3 Estudio granulométrico	41
3.2 Oleaje, corrientes y viento	42

3.3	Análisis de la morfodinámica de playas	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	47
4.1	Geomorfología	47
4.1.1	Tipificación de la costa por teledetección	47
	Tipo de litoral	48
	Ancho de playa	49
	Presencia de vegetación de duna	54
	Antropización	55
	Orientación de la costa	56
	Combinación de capas	58
4.1.2	Perfiles de playa	62
	Perfil promedio de playa	64
	Parámetro de forma A	69
	Evolución de perfiles de playa y cambio	72
	Pendiente en zona de swash	74
	Evolución de la posición de la línea de costa	78
4.2	Granulometría	85
4.3	Agentes de movimiento	89
4.3.1	Oleaje	89
4.3.2	Corrientes	92
4.3.3	Viento	96
4.4	Parámetro adimensional Omega	99
4.5	Indicador de susceptibilidad a la erosión	103
4.5.1	Integración de factores	103
4.5.2	Identificación de sitios prioritarios	106
CAPÍTULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	108
LITERATURA CITADA	114

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Pérdida de playa y daños a propiedades costeras por erosión, se observan los espigones rústicos hechos por los propietarios como acción urgente, con la intención de detener el efecto de erosión. Chelem, Octubre de 2002.....	9
Figura 2. Zonación de un perfil de playa típico. Tomado de US Army Corps of Engineers (USACE, 1984)	16
Figura 3. Características de una ola	19
Figura 4. Movimiento de partículas por acción del oleaje.....	20
Figura 5. Localización del área de estudio en Yucatán, México. Sitios de perfiles topo-batimétricos conformados por la zona A, en Chuburná y Chelem, zona B, en el Puerto de Progreso y C, en Uaymitún. Se muestra también la localización del instrumento de medición de oleaje	29
Figura 6. Tipo y orientación del litoral estudiado basado en la fotografía aérea de Diciembre de 2004	49
Figura 7. Ancho de playa basado en la fotografía aérea de Diciembre de 2004. Los segmentos de costa en rojo representan anchos de playa menores de 10m, en amarillo entre 10 y 25m y en verde mayores de 25m	50
Figura 8. Fotografía aérea de diciembre de 2004 con la línea de estimación de ancho de playa. El código de color de línea es explicado en la	

figura anterior. La fotografía superior corresponde a la zona adyacente a la escollera de Chuburná. La fotografía inferior corresponde a la playa de Progreso, frente al Malecón. La posición de la línea de costa es la determinada por INEGI a partir de la ortofoto	52
Figura 9. Histograma de frecuencias de los valores de ancho de playa obtenido de la capa raster de 20m de resolución espacial	53
Figura 10. Representación de la presencia de vegetación de duna y la antropización de costa a lo largo de la playa estudiada. Detalle de la zona de Chuburná	55
Figura 11. Orientación del litoral estudiado. La escala está ajustada a los valores presentes en la sección estudiada	57
Figura 12. Orientación del litoral estudiado resaltando sub-celdas de transporte	58
Figura 13. Tipificación de un segmento de playa en función del ancho de playa, presencia de antropización y presencia de vegetación de duna. En una escala de 0 a 50. Los cortes se realizaron en 0a 13; 14 a 30 y 31 a 45. A mayor valor, menos vulnerable	59
Figura 14. Tipificación de un segmento de playa en función del ancho de playa, extensión de asentamiento urbano y presencia de vegetación de duna. En una escala de 1 a 100. Los cortes se realizaron de 1 a 33 en tonos verde para la baja susceptibilidad; de 34 a 66 en tonos amarillos para mediana susceptibilidad; y de 64 a 100 en tonos rojos para alta susceptibilidad	60

Figura 15. Histogramas de frecuencias de las capas aplicadas para generar el indicador de susceptibilidad (MCE)	61
Figura 16. Perfil promedio de perfiles topobatimétricos con su respectiva desviación estándar a lo largo del perfil de cada sitio de muestreo	67
Figura 17. Desviación estándar máxima de los perfiles promedio y el ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006). En los recuadros se muestra los perfiles de mayor variación y anchos de playa menores de 20m	68
Figura 18. Perfil promedio de la zona de swash y surf de las tres zonas estudiadas (A, B y C) con la estimación del perfil de equilibrio tipo $h=Ax^2/3$. En la leyenda se muestra el valor del parámetro A para los perfiles graficados	71
Figura 19. Evolución de los cambios de perfiles topobatimétricos a partir del perfil inicial	73
Figura 20. Variabilidad temporal de la pendiente en la zona de swash en los perfiles A1 y A5. Las líneas verticales en la gráfica muestran el fin de cada año, para asociar la temporada de nortes.....	74
Figura 21. Pendiente promedio y su respectivo error estándar en la zona de swash para cada época climática	75
Figura 22. Pendiente en la zona de swash en cada uno de las zonas de estudio y por época climática. Nortes corresponde a los meses de octubre a febrero, secas de marzo a mayo y ondas tropicales de junio a noviembre	77

Figura 23. Tendencia del avance y retroceso de la línea de costa en el área de estudio. Los sitios A2, A3, A4, B1, B2, B4, B5, C2 y C4 fueron significativos	79
Figura 24. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona A, Chuburná y Chelem. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo	80
Figura 25. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona B, Puerto de Progreso. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo	81
Figura 26. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona C, Uaymitún. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo	82
Figura 27. Ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006) y desviación estándar en la zona de swash de los perfiles promedio	83
Figura 28. Ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006) y desviación estándar en la zona de swash de los perfiles promedio	85
Figura 29. Comparación de los diámetros de partículas en la zona de swash y la zona de surf. Se incluye el error estándar del valor promedio	89
Figura 30. Promedio mensual de la altura significativa del oleaje	91

Figura 31. Comportamiento mensual del período de oleaje (s) a lo largo del año.....	92
Figura 32. Dirección y velocidad del componente Arriba-Abajo del vector de velocidad (cm/s)	95
Figura 33. Velocidad de la corriente a lo largo del día (cm/s)	96
Figura 34. Patrones de viento dominante a lo largo del año por meses, de la estación climatológica automática de la ciudad de Mérida. Registros por anemómetros digitales de cada 10 minutos. La serie comprende datos desde el año 2000 al 2006	98
Figura 35. Variabilidad espacial del parámetro adimensional Omega, a lo largo de la costa y entre la zona de swash y zona de surf. Se muestran los valores promedio y error estándar.	100
Figura 36. Variación temporal del parámetro adimensional Omega en la zona de swash del perfil A5	101
Figura 37. Nivel de susceptibilidad a la erosión integrando los factores obtenidos en el análisis de la fotointerpretación y los obtenidos en el análisis de perfiles de playa.....	104
Figura 38. Mapa con la tipificación de vulnerabilidad a la erosión en el área de estudio. Los sitios marcados en rojo sugieren las áreas de mayor vulnerabilidad	107.

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1. Datos fuente para la descripción y análisis espacial de las playas por teledetección	33
Tabla 2. Número de perfiles topobatimétricos analizados	41
Tabla 3. Tabla de frecuencias por píxel procesado para determinar el ancho de playa	53
Tabla 4. Número de perfiles topobatimétricos analizados	63
Tabla 5. Coordenadas UTM y altura ortométrica con GPS diferencial (Datum WGS84) de los sitios de referencia para levantamientos topobatimétricos	64
Tabla 6. Descriptores estadísticos del análisis granulométrico de las muestras de sedimento correspondiente a la zona de swash. Los valores presentados en la tabla están en unidades phi	70
Tabla 7. Descriptores estadísticos del análisis granulométrico de las muestras de sedimento correspondiente a la zona de swash. Los valores presentados en la tabla están en unidades phi	86
Tabla 8. Clasificación del material sedimentario en la zona de swash, según Folk y Ward (Folk, 1966)	87

Tabla 9. Valores de la mediana (Percentil 50, D50) en mm del diámetro de partícula en la zona de swash determinados de datos colectados entre 2004 y 2005	88
Tabla 10. Frecuencias y porcentaje de la dirección de la corriente en 16 rangos. Velocidad promedio, D.E., mínimo y máximo de la corriente en las 16 direcciones (cm/s)	93
Tabla 11. Resumen de los descriptores morfodinámicos que tipifican las playa, siendo la pendiente de la zona de swash, la variabilidad de la misma zona, la tendencia de la línea de costa, tamaño de sedimento y los valores del parámetro omega	105

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La costa norte de la península de Yucatán presenta un sistema de islas de barreras y spits con una clara vocación turística, sin embargo se ha manifestado un problema de erosión de playas que pone en riesgo al ecosistema, propiedades y actividades socioeconómicas de la zona. Este trabajo contribuye con el entendimiento de la dinámica del sistema de playa en islas de barrera mediante la aplicación de un enfoque metodológico integrando descriptores geomorfológicos y morfodinámicos. Los resultados evalúan la vulnerabilidad a la erosión en playas para identificar zonas prioritarias de atención, lo que permitiría proponer recomendaciones apropiadas al manejo de playas.

1.1 Playas

En los ambientes costeros arenosos, el sedimento y los procesos que determinan su transporte, juegan un papel preponderante en la conformación y dinámica de la costa, especialmente en las playas, las cuales se definen como depósitos de material sedimentario no consolidado que se encuentran sujetos a la acción del oleaje (Hobbs, 2012; Dean y Dalrymple, 2002; Short, 1999). Si bien las playas son dependientes de la disponibilidad del material sedimentario y de los efectos del oleaje, también son influenciadas por otros procesos como la marea, los vientos, las corrientes, y factores fisiográficos tales como la batimetría, la pendiente de la playa y el tamaño de grano del sedimento. La playa, como sistema físico, es

uno de los más dinámicos en el planeta (Bird, 2000; Short, 1999) y se extienden a lo largo de las costas del mundo entre un 11% (Short, 1999) hasta 40%, (Bird, 2000).

El material sedimentario no consolidado de las playas, comúnmente proviene de la erosión de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, pero también puede ser formado por precipitación de procesos químicos (autigénico) o bien, por fragmentos de material generado por procesos fisiológicos de organismos marinos (biogénico) (Pettijohn et al., 1972). Conocer el origen del material sedimentario del que están formadas las playas resulta de gran importancia debido a que esta información proporciona características específicas como densidad y forma, características que permitirían complementar el entendimiento del transporte de arena en playas.

El material sedimentario presente en la zona de playa hasta la zona donde rompen las olas, constituye la base ecológica de comunidades biológicas. La arena de playas es el hábitat de organismos bentónicos, muchos de los cuáles, además de contribuir con la diversidad, forman parte fundamental de la red trófica y del delicado equilibrio de ecosistemas. Asimismo, desempeñan un papel importante para otros organismos como áreas de anidación aves y tortugas marinas. Un factor ecológico importante en el proceso de transporte de arena es la comunidad vegetal que se presenta tanto en duna como en el intermareal. La colonización vegetal actúa como trampa de sedimento, disminuyen la velocidad del viento cercana al suelo y crean ambientes de refugio donde se deposita y estabiliza la arena transportada por viento (Bird, 2000).

La playa es también uno de los ambientes más atractivos para realizar actividades de esparcimiento. El creciente interés por asentarse o visitar estos espacios ha promovido importantes inversiones económicas para el desarrollo de servicios turísticos. Sin embargo, debido a su constitución caracterizada por material sedimentario no consolidado, este tipo de ambientes cambia rápidamente de forma, en respuesta a la variabilidad de las fuerzas ambientales como la acción regular del oleaje o los efectos extremos como los causados por el paso de huracanes. Es por ello que las playas de arena son sistemas altamente dinámicos en su geomorfología, lo que en ocasiones pone en riesgo la integridad de la infraestructura desarrollada en ellos y por tanto, pone en peligro la misma integridad de la población humana y sus actividades. Tales cambios colocan también en situaciones preocupantes a los ecosistemas y hábitats así como a las comunidades de organismos dependientes de éstos. Este conjunto de amenazas motiva la realización de estudios sobre los procesos físicos costeros, orientados a resolver problemas asociados a la erosión de playas o incluso a problemas de asolvamiento de material sedimentario en lugares donde no es deseable su acumulación. La información geomorfológica y morfodinámica de playas ha sido empleada para determinar la vulnerabilidad de la costa y la evaluación de impactos ambientales para el desarrollo de proyectos y actividades humanas (Bakri, 1996). Un buen entendimiento de la morfodinámica de playas y los procesos costeros involucrados permite contar con el marco conceptual básico para una mejor planeación de manejo y aprovechamiento de este ambiente costero de gran importancia, evitando así pagar altos costos económicos, sociales y ambientales innecesariamente.

1.2 Erosión de playas

La depositación de material sedimentario o la erosión en una playa es una respuesta natural de las condiciones geomorfológicas a los procesos que controlan el movimiento de partículas sedimentarias en la costa, sin embargo, la pérdida de sedimento por acción de corrientes generadas por oleaje, marea, o viento, representa un problema cuando amenaza los desarrollos humanos (USACE, 1984). Los efectos de estos procesos son acentuados por cambios en el aumento del nivel del mar y fenómenos meteorológicos extremos como huracanes (Forbes *et. al.*, 2004; Curtis y Hodell, 1996; Hooke y Carter, 1995). A su vez, el riesgo de erosión se incrementa al presentarse cambios en los patrones de transporte inducidos por efecto de las acciones del hombre, como la construcción de infraestructura marítima, de protección o por deforestación del área de duna. Al perder material sedimentario, la playa se deteriora y pierde su efecto amortiguador, poniendo en riesgo a las propiedades que se encuentran adyacentes a estos ambientes, como hoteles, casas-habitación u otros desarrollos. Aunado a la pérdida económica, el deterioro de la playa afecta también su equilibrio ecológico y el de los ecosistemas costeros contiguos.

Entender adecuadamente la naturaleza del proceso de erosión/acresión requiere de estudios sistemáticos de campo, estudios de laboratorio y del uso de modelos físicos a escala y de naturaleza numérica para simular posibles escenarios

futuros. Los estudios de campo y de laboratorio son fundamentales para el entendimiento de la evolución de playas, y proporcionan los datos necesarios para aplicar los modelos que simulan la dinámica de estos sistemas (e.g. Benedet *et al.*, 2004a; Bernabeu *et al.*, 2003; Wang y Kraus, 1999; Larson, 1991; Work y Dean, 1991). Los estudios con modelos físicos a escala, son muy empleados para el diseño portuario, aunque con altos costos y limitados en su semejanza a la realidad. Los estudios de modelación numérica que permiten simular la evolución de playas son alimentados con datos que los estudios de campo y laboratorio generan, proporcionando aproximaciones también limitadas pero flexibles y de menor costo (Prasad y Svendsen, 2003; Capobianco *et al.*, 2002; Komar, 1995; Azuz-Adeath, 1995). El empleo de modelos numéricos para simulación de evolución de playa han resultan útiles al ser una herramienta que explora las relaciones entre los procesos hidrodinámicos y la respuesta en la morfología de la playa (Bird, 2000), lo que brinda al tanto al investigador como al tomador de decisiones una mejor comprensión de los procesos costeros. Los modelos numéricos presentan varias ventajas sobre los estudios con modelos de campo y laboratorio por demandar costos menores, permite controlar algunos parámetros determinantes y algunas condiciones del sistema. Sin embargo, aún no existen modelos lo suficientemente útiles en ingeniería costera que se apeguen a la realidad, debido a la complejidad del sistema, por lo que es necesario que modeladores matemáticos e investigadores trabajen en combinación para tener un mejor entendimiento de los procesos de erosión (Pilkey, 1998).

1.3 Morfodinámica de playas

El estudio de la geomorfología costera se relaciona con la evolución de las formas de costa (acantilados, costas rocosas, playas, dunas, estuarios, lagunas y deltas), los procesos que actúan en ella y los cambios que toman lugar (Bird, 2000). La forma de las playas es muy variable en ancho, altura y geometría del litoral. Su morfología es determinada por los mismos procesos de transporte de sedimento que actúan en el proceso de erosión, así como también las características texturales del material sedimentario que la conforma, como la distribución del tamaño de grano, la forma de éstos y su composición (Open University, 1989). Otros elementos que también influyen son la presencia de componentes naturales y antropogénicos propios del mismo paisaje como es la vegetación de duna o la presencia de construcciones como casas y hoteles, y de manera directa la presencia de infraestructura costera como muelles, puertos de abrigo, escolleras, espigones, arrecifes artificiales, etc.

En el estudio de costas, el término morfodinámica fue introducido a la literatura costera por Wright y Thom en 1977 (Short, 1999), quienes lo definieron como un ajuste mutuo de la topografía y la dinámica de fluidos involucrando el transporte sedimentario. Particularmente en playas, esto implica que la superficie topográfica de la playa se ajustará para acomodarse a los movimientos de las corrientes derivadas por la acción del oleaje, mareas, y viento, proceso central en esta propuesta de investigación.

Los requerimientos de información necesarios que permitirían caracterizar y entender la dinámica de playas están constituidos por datos sobre: geomorfología, topo-batimetría de playa, transporte litoral, sedimentología, oleaje, marea, corrientes, clima. La generación de este tipo de datos es facilitada por diversas técnicas. La caracterización de playas a través de métodos de percepción remota como es el análisis de fotografía aérea, análisis de imágenes de satélite, complementado con perfiles topo-batimétricos de playas y granulometría, análisis hidrodinámico, siendo éstas mediciones directas de oleaje, marea, y corrientes, así como la colecta de datos disponibles de la NOAA y de otras organizaciones internacionales que disponen de equipos de teledetección o de boyas oceanográficas que registran series de variables y las envían a centros de captura y redistribución.

1.4 Planteamiento del problema

Los cambios ocurridos en las costas son evidentes, en particular la erosión en playas causada por eventos meteorológicos extremos como los huracanes. La erosión se ha incrementado en muchas costas del mundo (Clark, 1996), en general, el efecto de la erosión inicia con la pérdida del área de playa seguida de la pérdida de los bienes materiales, los cuales resultan de gran importancia económica (Komar, 1995) dado que las playas son el principal destino turístico en México. La Secretaría de Turismo reporta que en el 2010 la contribución del turismo a la economía nacional fue del 8.6% del Producto Interno Bruto, equivalente a 971,868 millones de dólares,

con una tasa promedio de crecimiento anual de 7.8%, siendo los centros de playa el principal destino turístico en México de visitantes. En el 2011 el 47.7% de los visitantes nacionales e internacionales fueron registrados en los centros de playa (Secretaría de Turismo, 2012; Data Tur, 2012). Esto ha justificado la inversión por parte del gobierno y de inversionistas en el desarrollo de destinos de playa así como la inversión en investigación científica y la recuperación de playas.

En la costa norte de la península de Yucatán, el problema de erosión de playa se ha manifestado de manera preocupante, afectando las propiedades próximas a la línea de costa. Este problema cobra gran importancia por la vocación turística y recreativa de la zona, así como por el alto grado de urbanización que presentan algunas porciones costeras. Por su ubicación geográfica, la costa de Yucatán se encuentra expuesta continuamente al efecto de tormentas tropicales, huracanes y nortes, fenómenos naturales que intensifican los efectos de los procesos de transporte de sedimento y causan cambios importantes en la morfología de playas. Adicionalmente, secretarías de gobierno federal como la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), gobiernos de algunos municipios costeros y propietarios de terrenos particulares han tomado diversas iniciativas, muchas de ellas inadecuadas, para intentar estabilizar la línea de costa ante la amenaza de la erosión (Figura 1). Entre las acciones más utilizadas en la región se encuentran la construcción de espigones, y recientemente la alimentación de playas. Sin embargo escasos estudios soportan tales acciones dando como resultado algunos escenarios

contraproducentes de mayor gravedad en comparación con los ocasionados por los procesos naturales. Pese al interés local y regional que existe por conservar las playas debido al uso que presentan, no son muchos los estudios sobre procesos de transporte sedimentario costero desarrollados en la región (e.g. Appendini *et al.*, 2012; Nolasco-Montero y Carranza-Edwards, 1988; Meyer-Arendt, 1993; Meyer-Arendt, 1991, Barrera Ceballos, 2001; Jaimes de la Cruz, 1995; CINVESTAV-SEMARNAT, 2003, Informes diversos de monitoreo de playas). Esta escasa información constituye una oportunidad para poner en marcha iniciativas interdisciplinarias, en conjunto con los usuarios, academia y gobierno para implementar acciones soportadas por estudios de largo plazo y realizar un mejor manejo de este valioso ecosistema.



Figura1. Pérdida de playa y daños a propiedades costeras por erosión, se observan los espigones rústicos hechos por los propietarios como acción urgente, con la intención de detener el efecto de erosión. Chelem, Yucatán, octubre de 2002.

Por lo anterior, el interés de este trabajo está en ampliar el entendimiento de la dinámica del sistema de playa en islas de barrera mediante la aplicación de un enfoque metodológico que integre descriptores geomorfológicos y un análisis morfodinámico, a través de una caracterización de las playas y de los procesos dominantes de transporte de sedimento. Este estudio permitirá obtener datos para evaluar la susceptibilidad a la erosión en playas y tipificarlas. Esta información brindará los elementos de base para proponer recomendaciones al manejo de playas.

1.5 Hipótesis de trabajo

A lo largo de las playas en la porción central de la costa norte de Yucatán se presentan algunas características morfológicas generales homogéneas como su origen geológico, topografía, una línea de costa generalmente larga y con escasas inflexiones, sujeto a un sistema de isla de barrera, una amplia plataforma con pendiente suave hacia el Golfo de México, material sedimentario carbonatado y biogénico, controlado por las mismas condiciones marítimas (Meyer, 1993, Nolasco-Montero y Carranza-Edwards, 1988). Sin embargo, la erosión que se observa no presenta el mismo nivel de avance o de amenaza a lo largo de la playa y los

asentamientos humanos y sus acciones de protección no se presentan homogéneamente a lo largo de la misma. Por ello se considera que sus características morfodinámicas y por tanto la vulnerabilidad de los asentamientos a la erosión presentan un gradiente a lo largo de la playa estudiada.

1.6 Objetivo general

El propósito de este estudio es caracterizar la dinámica de la morfología de playas en la porción central de la costa del estado de Yucatán, para tipificar el litoral de playa en función de su morfodinámica y generar un indicador numérico con niveles de vulnerabilidad a la erosión que permita señalar las zonas de playa prioritarias de atención y formas de intervención en su manejo con el interés de reducir los riesgos de daño que la población y sus bienes puedan sufrir.

Para ello es necesario caracterizar la geomorfología de playas, por percepción remota y sistemas de información geográfica así como un análisis de las características dinámicas del perfil de playa. Se complementa con un estudio de las características sedimentarias y los factores ambientales, imperantes de la región, responsables del transporte de sedimento y de la morfología de playa. se describe la caracterización geomorfológica y la distribución espacial de los componentes paisajísticos adyacentes a la línea de costa. Se diagnostica el comportamiento de la línea de costa con métodos de percepción remota y sistemas de información

geográfica. Se analiza la dinámica de cambio de perfiles topobatimétricos y las características del sedimento en conjunto con la hidrodinámica imperante en la región.

1.6.1 Objetivos específicos

Geomorfología

1. Caracterizar las playas de la porción central de la costa del Estado de Yucatán, a través de su geomorfología, empleando la información obtenida a partir de imágenes aéreas mediante métodos de percepción remota.

2. Explorar algunas herramientas geoespaciales de SIG para determinar áreas críticas en lo relativo al proceso de erosión en la costa de Yucatán y susceptibilidad a la erosión.

Morfodinámica

3. Obtener una tipificación de playas de sedimento carbonatado considerando la variación espacio-temporal de las características morfodinámicas en la zona central de la costa del estado de Yucatán. Los elementos de caracterización involucran, cambios en la pendiente en la zona de swash, análisis del perfil promedio de playa a través de la estimación del parámetro de forma del perfil de equilibrio de

Dean, avances y retroceso de la línea de costa, así como caracterización granulométrica del sedimento y oleaje para determinar al parámetro Ω y su variación a largo de la costa y durante las temporadas climáticas.

4. Caracterizar los patrones de vientos dominantes que afectan el transporte sedimentario en playas, a partir de las bases de datos de las estaciones climatológicas costeras, disponibles por la CNA.

5. Caracterizar los patrones de oleaje y corrientes dominantes que afectan el transporte sedimentario en playas, a partir de las bases de los instrumentos marinos fondeados por el CINVESTAV, Unidad Mérida.

6. Tipificar la playa en función de los valores de vulnerabilidad a la erosión e identificar los sitios prioritarios, analizándolos integralmente con los descriptores obtenidos, para hacer las recomendaciones apropiadas a dichos sitio.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En su sentido básico, el área costera representa la frontera entre los ambientes terrestres y los marinos, el lugar donde la tierra colinda con el mar. Este sencillo concepto describe la costa solo como un rasgo geográfico pero no expresa la complejidad de interacciones de los procesos naturales y antropogénicos implicados en esta área. Una gran variedad de ecosistemas se encuentran distribuidos a lo largo de la zona costera como manglares, dunas, lagunas costeras, esteros, playas, etcétera. La distribución y abundancia de los recursos naturales presentes en estos ecosistemas está determinada por los procesos atmosféricos, hidrodinámicos, geológicos, biológicos y antropogénicos. Siendo entonces, la zona costera un área de transición entre mar, tierra y atmósfera, los procesos mencionados la condicionan a una alta variabilidad ambiental, expresándose en frecuentes cambios en su geomorfología a diversas escalas. En este margen continental, donde los diversos ecosistemas terrestres y marinos interactúan, se mantiene un equilibrio ambiental dinámico ante la amplia variedad de acciones y reacciones de los componentes involucrados, su preferencia da lugar a una intensa actividad humana. Es por todo ello que para la sociedad en general, la zona costera desempeña un papel muy importante en sus diferentes ámbitos (político, económico, productivo, recreativo, ecológico y cultural), lo cual obliga a los planeadores a entender los procesos naturales que actúan en los diversos ambientes costeros para efectuar un mejor manejo (Oropeza-Orozco *et al.*, 2011). Las playas, como el resto de los ambientes costeros juegan también un papel preponderante por lo que un mejor entendimiento

de ésta contribuirá con información de base a un manejo costero que pretenda ser integrador en los diversos actores y procesos de la zona costera. (French, 2001; UN, 1992; Turner et al., 1998)

2.1 Geomorfología costera y morfodinámica de playas

La geomorfología costera se relaciona con la evolución de las formas de costa (acantilados, costas rocosas, playas, dunas, estuarios, lagunas y deltas), los procesos que actúan en ella y los cambios que toman lugar (Bird, 2000). La geomorfología de las playas puede ser definida por la zonación perpendicular a la línea de costa. Esta zonación es descrita gráficamente en la Figura 2, donde se muestra un perfil de playa típico. En esta zonación encontramos las partes de una costa y la porción de playa asociada con los agentes de transporte.

Se ha demostrado en algunos estudios que las condiciones de contaminación, ecología bentónica y otras condiciones ambientales de la costa se encuentra en función de la geomorfología de la línea de costa, la sedimentología y procesos hidrodinámicos (Bakri, 1996).

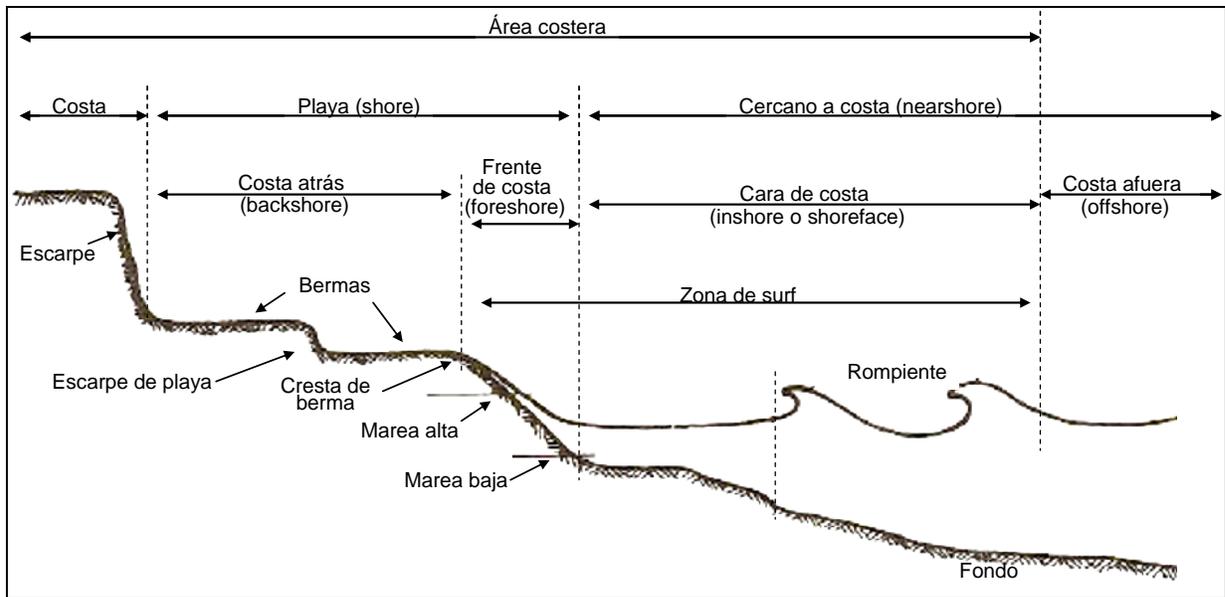


Figura 2. Zonación de un perfil de playa típico. Modificado de US Army Corps of Engineers (USACE, 1984).

La playa puede ser definida con un número diverso de formas, sin embargo dos ingredientes son esenciales, oleaje y sedimento. La definición más simple de playa es una acumulación de sedimento por depositación del oleaje que yace entre la profundidad de cierre de la ola y el límite superior de la zona de swash, donde la profundidad de cierre de la ola es la profundidad máxima en la cual las olas pueden transportar material de playa hacia la costa, y el límite de swash es el límite en tierra de la acción subaérea del oleaje y transporte sedimentario (Short, 1999). Sin embargo, existen otras zonas y procesos no explícitamente incluidos en el espacio que sugiere esta definición, como la zona de rompiente, la línea de costa, la franja intermareal y procesos de mareas. Especialmente, la playa puede ser estudiada en

sus diferentes dimensiones. En dos dimensiones como se muestra en la figura 2, y en tres dimensiones al considerar la extensión litoral de la playa. Las formas, tanto perpendicular a la costa como longitudinal varían considerablemente, principalmente en función del patrón energético de transporte y condiciones geomorfológicas.

El término morfodinámica fue introducido a la literatura costera por Wright y Thom en 1977 (Short, 1999), quienes la definieron como un ajuste mutuo de la topografía y la dinámica de fluidos involucrando el transporte sedimentario. Particularmente en playas, esto implica que la superficie topográfica de la playa se ajustará para acomodarse a los movimientos de los fluidos producidos por viento, oleaje, mareas y otras corrientes.

Un perfil de playa describe la forma topográfica sobre una línea perpendicular a la costa con los rasgos característicos que reflejan la acción de los procesos litorales. Generalmente, en el perfil de playa se puede identificar rasgos morfológicos como son la duna, la berma, la cara de la playa, etc. (Figura 2).

2.2 Agentes de transporte sedimentario

Dado que la geomorfología costera es el resultado de la acción de los procesos responsables del transporte de material sedimentario, en esta sección se desarrolla una descripción de los principales agentes de transporte. Entre los ellos se encuentran la marea, el oleaje, y el viento. En esta sección se explicará brevemente

las características de estos agentes de transporte y su influencia sobre la morfología de playa.

La marea es la elevación y caída del nivel de mar por efecto gravitacional de cuerpos celestes como la luna y el sol, producen patrones de corrientes característicos como puede ser observado en la boca de estuarios o lagunas costeras. Sus efectos también son observados en la morfología del litoral por las marcas físicas en la topografía de la playa permitiendo observar los niveles de marea baja y alta, determinando una zona muy importante de transporte de sedimento, la zona litoral o intermareal (“foreshore”). Esta zona su vez adquiere una gran importancia ecológica ya que determina la frontera de comunidades bentónicas distintivas en estructura y función ecológica. La corriente de agua producida durante la elevación de la marea es conocida como flujo (“flood”) y la corriente producida durante la caída de la marea se le llama reflujo (“ebb”). En función de la amplitud mareal, la velocidad de cambio de marea, la topografía y la configuración costera, es modificada la morfología de la playa (Kamphius, 2010).

Otro agente de transporte de sedimento de gran importancia es el oleaje. La ola es un movimiento ondulatorio de la superficie del agua. El tipo de ola que en este trabajo se atenderá es aquella cuya restitución es en respuesta a la fuerza de gravedad y su origen principal es el viento o tormentas. El oleaje tiene los mismos descriptores que cualquier tipo de onda como longitud de onda, período, frecuencia, cresta y valle (Figura 3). Éstas producen un movimiento circular en las partículas de agua (Kamphius, 2010).

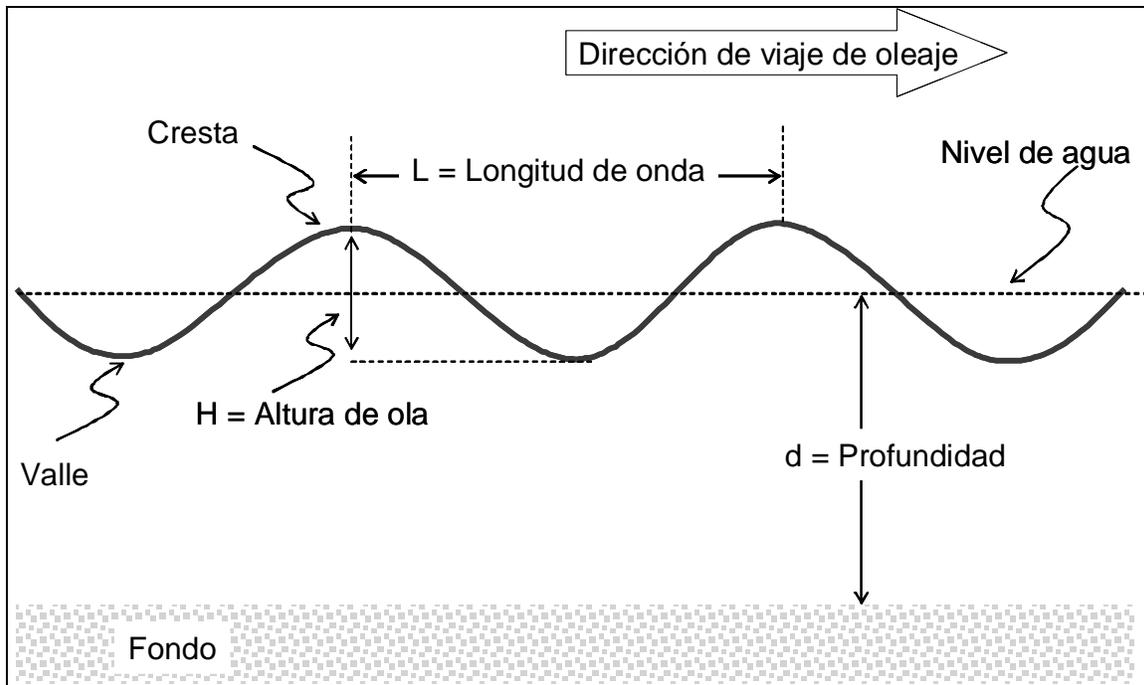


Figura. 3. Características de una ola (Modificado de Reeve *et al.*, 2004).

Cuando este fenómeno se encuentra en aguas someras, es decir, cuando la profundidad es la mitad de la longitud de onda o menor, se dice que la ola siente fondo (Figura 4). Es bajo esta circunstancia cuando el oleaje es capaz de poner en movimiento el material no consolidado participando así en el transporte litoral. El oleaje es responsable de generar diferentes corrientes en el litoral, y las cuales son cómplices en el transporte de importantes volúmenes de sedimento. Tales corrientes son capaces de cargar cierta cantidad y calidad de sedimento, transportándolo de forma perpendicular o paralelo a la costa.

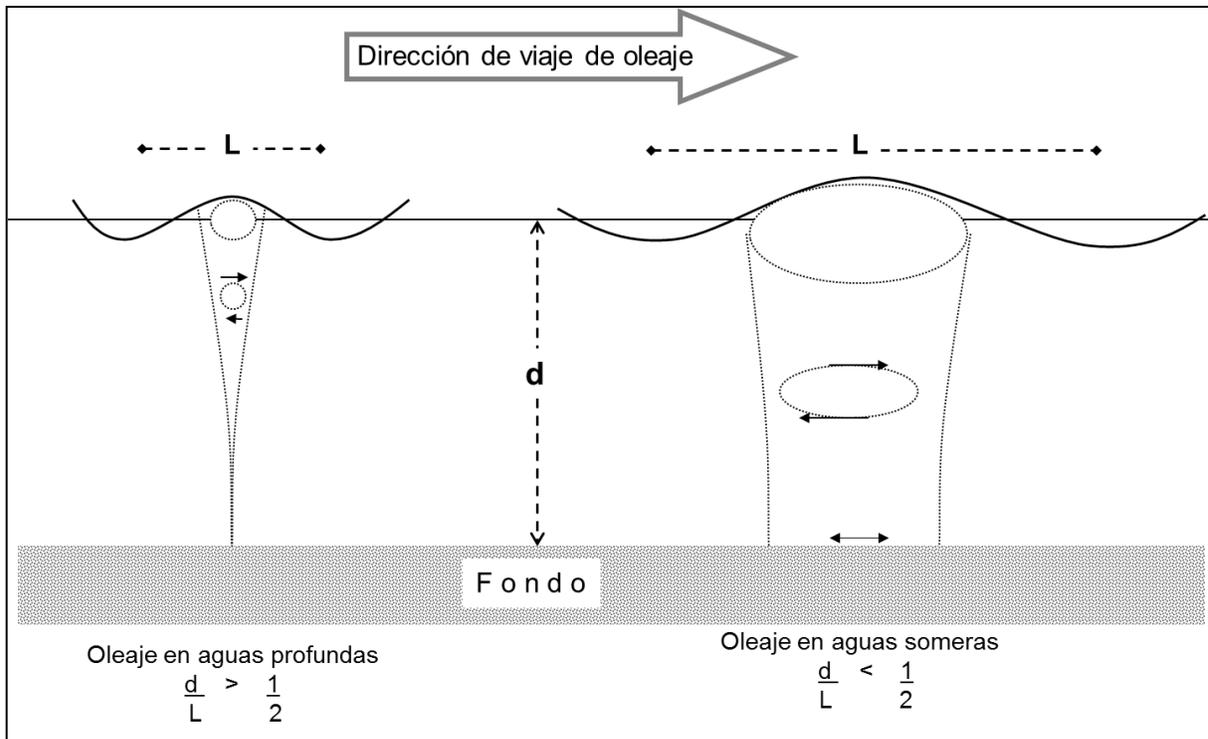


Figura 4. Movimiento de partículas por acción del oleaje (Modificado de Reeve *et al.*, 2004).

El perfil de playa constantemente se encuentra en ajuste o adaptación como respuesta ante la constante variación de energía del oleaje incidente. Existen dos tipos generales de respuesta dinámica de playa al movimiento por oleaje: Respuesta a las condiciones normales y respuesta a las condiciones de tormenta. En ambos casos son las condiciones meteorológicas las que promueven el oleaje. Las diferencias de presión atmosférica son la causa de la generación de viento. Si éste actúa durante cierto tiempo en cierto espacio sobre la superficie marina (Fetch) es capaz de generar oleaje. Esta energía transferida viaja por la superficie del mar y es

hasta sentir fondo cuando este agente de transporte de sedimento se convierte en un proceso más complejo, al intervenir otros factores como la topografía, la configuración de la costa y el ángulo de incidencia del mismo oleaje entre otros. Simultáneamente el oleaje sufre efectos de refracción, difracción o reflexión, así como su propia inestabilidad expresada en su rompiente, la cual produce importantes efectos de turbulencia con gran capacidad de poner el sedimento depositado en suspensión y por tanto en mayor disposición a ser transportado. Todos estos procesos a su vez pueden estar combinados con otros ya mencionados que pueden estar actuando como el viento y la marea (Kamphius, 2010; Reeve *et al.*, 2004).

El estudio de transporte de sedimento puede ser sumamente complejo, pero ya que la morfología de la playa está dada por la depositación y erosión de sedimento como el efecto acumulado de la acción de los agentes de transporte, quienes se encargan de moldear continuamente la forma de la playa, se considera que la morfología de playa es el resultado último de la acción de los agentes de transporte de sedimento en un tiempo determinado. Por ello las condiciones y características de una playa son la expresión de la energía a la que ha sido expuesta en las últimas horas (Short, 1999)

2.3 Modelos de evolución de playa

Los modelos matemáticos son usados cada vez con mayor frecuencia tanto para problemas científicos como en aplicaciones de ingeniería. Tales modelos ofrecen una gran cantidad y calidad de información para el desarrollo del conocimiento sobre procesos naturales, permitiendo valorar la importancia relativa de parámetros particulares y aplicaciones en propósitos de ingeniería (Pilkey, 1998).

Un modelo matemático se define como una descripción desde el punto de vista de las matemáticas de un hecho o fenómeno del mundo real, desde el tamaño de la población, hasta fenómenos físicos. La finalidad de un modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno y en algunos casos proponer una predicción del comportamiento en el tiempo o el espacio (Mendoza Grande, 2004).

Los modelos numéricos pueden jugar un papel fundamental en los proyectos de conservación de playas, especialmente en la etapa de planeación, cuando la alimentación de playa se convierte en un componente integral de una estrategia en el manejo costero (Capobianco *et al.*, 2002).

Sofisticados modelos numéricos tales como GENESIS (Hanson, 1989) y SBEACH (Larson y Kraus, 1989) han sido utilizados para predecir el comportamiento de playa. Sin embargo cada uno de estos modelos tiene sus propios supuestos y limitaciones. Tal es el caso de GENESIS, el cual ignora el transporte normal de arena, mientras que SBAECH ignora el transporte litoral. Asimismo, GENESIS, el

papel individual de tormentas, mientras que otros como SBEACH, si lo consideran, pero emplea alturas y períodos de olas monocromáticas (Pilkey, 1998). SBEACH (Larson, 1988; Larson and Kraus 1989.) es un modelo numérico que simula cambios de perfiles de playa en macroescala incluyendo los movimientos de la barra de rompiente y movimientos en berma. La dirección total de transporte de sedimento.

Las omisiones de los diferentes modelos numéricos en importantes procesos garantizan limitaciones en la precisión de la predicción de los cambios en la línea de costa. Sin embargo, emplearlos en combinación permitiría entender con mayor precisión la naturaleza de los procesos costeros y proporcionarían una tendencia general de la evolución de playa.

2.4 Herramientas geoespaciales

Con el acelerado desarrollo de las herramientas computacionales la generación de datos, y en particular, de datos espaciales, se ha incrementado y con ello la enorme diversidad de aplicaciones para la creación de mapas y estudios de espacio temporales de múltiples factores y variables (Burrough y McDonnell, 1998). Existen diferentes formas de analizar datos espaciales, los sistemas de información geográfica permiten incorporar en una base de datos geográfica información de distinta naturaleza y origen, y existen herramientas que ofrecen tratamientos geoestadísticos para generar capas continuas de distribución espacial de factores y

variables. También, los sistemas de información geográfica ofrecen posibilidades de emplear herramientas que permiten integrar estas capas con el fin de explorar alternativas bajo la luz de diferentes criterios para generar soluciones o jerarquizaciones. Una de estas herramientas la evaluación multicriterio (Barredo, 1996).

Basado en el concepto de análisis de evaluación multicriterio (MCE, por sus siglas en inglés Multi Criteria Evaluation) es posible aplicar este método para determinar una tipificación y jerarquización de las zonas de mayor susceptibilidad a la erosión en función de la combinación de las características geomorfológicas e hidrodinámicas del sistema de islas en barrera.

2.5 Tipificación geomorfológica

Tipificar la costa arenosa con fines de identificar los niveles de vulnerabilidad a la erosión permitiría brindar una estrategia de manejo apropiada priorizando aquellas zonas que requieran de pronta y mayor atención. Esta tipificación también contribuiría a entender mejor las causas del contexto de las playas en el área de estudio permitiendo así implementar acciones apropiadas a cada localidad, aprovechando los recursos de manera sustentable.

Los requerimientos de información necesarios que contribuyen a caracterizar para su tipificación, son la dinámica de las playas asociada a la erosión y acumulación de sedimento. Con propósitos de manejo están constituidos por datos

como el ancho de playa, presencia de vegetación de duna costera, topografía, configuración costera, uso de suelo, entre otros (Ferreira *et al.*, 2006).

La morfología de duna-playa puede ser muy heterogénea, su variación y equilibrio dependen de múltiples factores como el tamaño de grano, la intensidad de energía de oleaje, la disponibilidad de sedimento, la batimetría, la configuración costera y su relación por la acción del oleaje (Bernabeu *et al.*, 2003; Open University, 1989; Dean, 1977). Una playa con un amplio desarrollo de “backshore” arenoso por características en el régimen de depositación de sedimento refleja condiciones de baja energía y disponibilidad de sedimento (Bird, 2000) y dado que la playa protege las propiedades costeras, se consideró en este trabajo el ancho de playa como atributo geomorfológico, donde a mayor ancho de playa, menor la vulnerabilidad por erosión (Mwakumanya *et al.*, 2009).

El agente que controla el transporte de arena en la zona de duna es el viento y la vegetación colonizante en esta zona disminuye la velocidad del viento cerca del sustrato, creando un ambiente protegido que permite la depositación de arena transportada por el viento (Bird, 2000; Goldsmith 1989). Por la importancia de la vegetación de duna para la estabilización y progradación de playa se consideró como atributo geomorfológico que brinda protección a la playa ante la erosión costera.

Las modificaciones antropogénicas por utilización en residencias y actividades turísticas, representan una fuerte influencia en la geomorfología de playa arenosa (Dallas and Barnard, 2011; Catto *et al.*, 2002; Bakri, 1996). Adicionalmente, el

concepto de vulnerabilidad es una característica dinámica asociada a la comunidad humana y su infraestructura (Thywissen, 2006). Por ambas razones, se propone en este trabajo la extensión de asentamiento antrópico costero adyacente a la playa como atributo geomorfológico susceptible a ser vulnerable.

Todas las playas por definición están dominadas por oleaje (Short, 1999) y la energía de transporte de sedimento depende de la altura del oleaje (USACE, 1984). Esta energía es disipada en distintos niveles dependiendo de varios factores morfológicos de la playa, uno de ellos es el ángulo de incidencia o avance del tren de oleaje con que arriba a la línea de costa (Falqués, 2006; van den Berg *et al.*, 2011; Appendini *et al.*, 2012). Por tanto, dicho ángulo depende del ángulo de aproximación del oleaje en relación con la orientación de la línea de costa. Por ello se propone el ángulo de orientación de la línea de playa con respecto al oleaje como otro atributo geomorfológico para determinar la vulnerabilidad a la erosión.

Los estudios de la línea de costa son facilitados cuando se tiene acceso a vistas panorámicas o sinópticas del litoral, por ello, las técnicas de percepción remota son una herramienta óptima para desarrollar una caracterización del litoral. Una tipificación de la costa permitiría a los tomadores de decisión una mejor comprensión de los procesos de cambio e identificar las zonas que requieren atención prioritaria (Finkl, 2004). Los diversos atributos obtenidos de la caracterización de playas a través de análisis de fotografía aérea, aportan información geomorfológica de base, la cual puede sintetizarse, mediante técnicas de sistemas de información geográfica, en un indicador que permita determinar los sitios de mayor vulnerabilidad a la erosión

y a su vez los sitios que pongan en peligros los asentamientos o actividades humanas. El propósito de este estudio es proponer un método cartográfico que permita identificar oportunamente zonas del litoral de playa arenosa con mayor vulnerabilidad a la erosión costera. Este método permitiría alertar a los tomadores de decisión sobre la necesidad de implementar acciones de reduzcan los riesgos en orientando los recursos a zonas de mayor prioridad por vulnerabilidad. El método propuesto se basa en atributos geomorfológicos y antropogénicos de la costa.

2.6 Área de estudio y antecedentes

La plataforma de Yucatán corresponde a la parte sumergida de una placa caliza que incluye la Península de Yucatán. La placa tiene una suave pendiente hacia el norte y es bordeada en el oeste, norte y este por el talud continental que se desploma desde la margen de la plataforma sumergida a profundidades abisales del Mar Caribe y Golfo de México. El régimen mareal es mixto, predominando la marea diurna y con marea semidiurna ocurriendo durante mareas muertas. El rango mareal varía de 0.1 y 0.8 metros, en mareas muertas y vivas respectivamente (Reyes, tesis en preparación). Las condiciones sedimentarias de la plataforma de Yucatán han sido similares desde el Terciario (66Ma) y Pleistoceno temprano (1.6Ma), hasta el Cuaternario tardío (10,000a), esto es, una depositación de sedimentos carbonatados sobre roca caliza antigua. La tierra emergente adyacente, se caracteriza por presentar una topografía cárstica que carece de un sistema de drenaje superficial,

por lo que el material sedimentario dominante está constituido de sedimentos carbonatados propios de la misma plataforma y carente de material terrígenos (Logan *et al.*, 1969). En este trabajo los estudios se realizaron en la porción de playa correspondiente al estado de Yucatán, donde el material sedimentario que la forma consiste, en su mayoría, de material calcáreo de origen biológico como fragmentos de concha, coral, algas, espículas de erizo, etc. (Nolasco-Montero y Carranza-Edwards, 1988). La forma de la zona costera corresponde a un sistema de restingas (spits) e islas de barrera, que forman un sistema de humedales a lo largo de todo el Estado.

El área de estudio se extiende desde el Puerto de Chuburná hasta Uaymitún, Yucatán, correspondiente a la porción central del litoral arenoso del norte del Estado (Figura 5). Se presentan diversos asentamientos antropogénicos siendo éstos las poblaciones de Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub y Uaymitún. Asentamientos en los que se combinan propiedades veraniegas y de residentes permanentes. Las propiedades veraniegas son particularmente empleadas durante los periodos vacaciones. Otras actividades en la zona están asociadas al puerto de altura y el manejo de carga y pasajeros, la pesca ribereña y de mediana altura, el turismo y la investigación.

El problema de erosión de playa en las costas de Yucatán es preocupante, afectando las propiedades próximas a la línea de costa, cobra gran importancia por la vocación turística y recreativa de la zona, así como por el alto grado de urbanización que presentan algunas porciones costeras. Por su ubicación geográfica,

la costa de Yucatán se encuentra expuesta continuamente al efecto de tormentas tropicales, huracanes y nortes, fenómenos naturales que intensifican los efectos de los procesos de transporte de sedimento y causan cambios importantes en la morfología de playas. Entre las acciones de protección más utilizadas en la región se encuentran la construcción de escolleras, espigones, y recientemente la alimentación de playas (Meyer-Arendt, 1991; Meyer-Arendt, 1993).

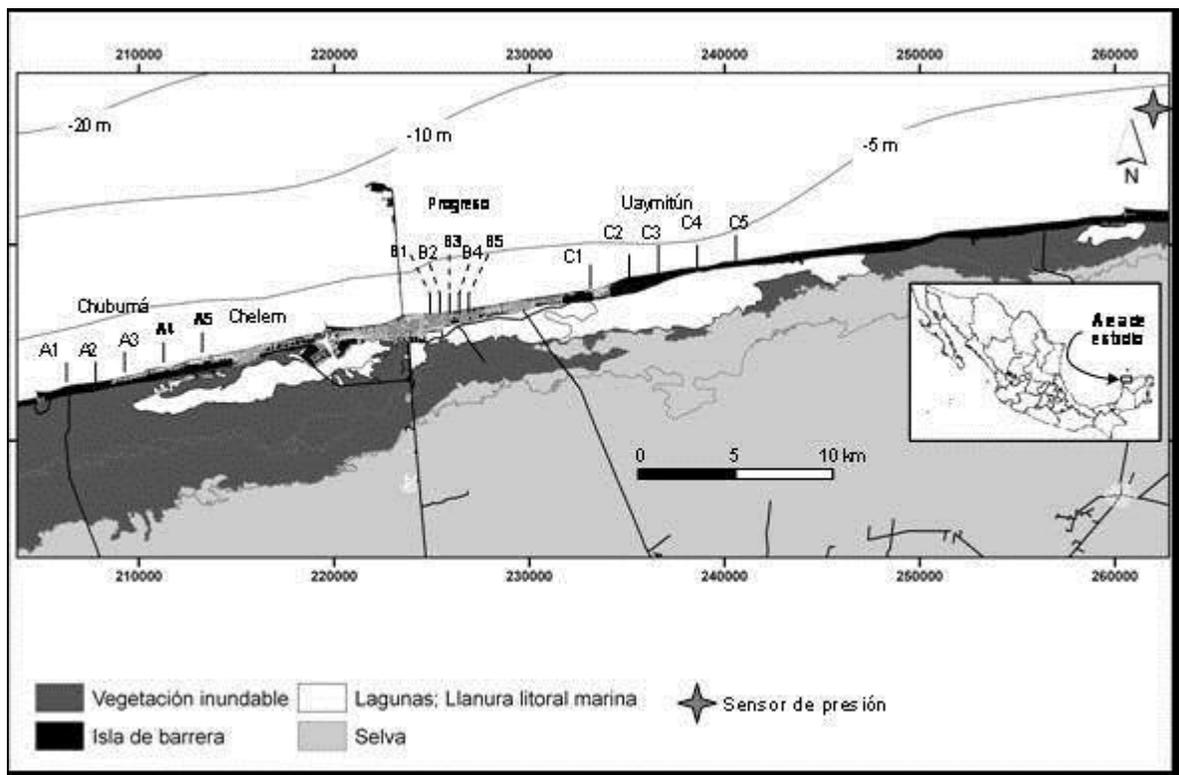


Figura 5. Localización del área de estudio en Yucatán, México. Sitios de perfiles topo-batimétricos conformados por la zona A, en Chuburná y Chelem, zona B, en el Puerto de Progreso y C, en Uaymitún. Se muestra también la localización del instrumento de medición de oleaje.

CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO

Para conocer y explicar la morfodinámica de playas del estado de Yucatán, se estructuró el estudio bajo la siguiente aproximación metodológica. Considerando que la morfodinámica de playas se define por el ajuste mutuo entre la topografía y la dinámica de fluidos implicada en el transporte de sedimentos (Wright y Thom, 1977, en Short, 1999), en la primera aproximación se realizó una descripción de los elementos paisajísticos y se analizó la expresión geomorfológica de playas empleando herramientas de teledetección, adoptando un método de clasificación apropiado que integre y sintetice la información colectada, expresándola en un indicador, que permita identificar diferentes niveles de susceptibilidad a la erosión en playas. En complemento a la descripción morfológica se levantaron perfiles topobatimétricos en diferentes sitios con una frecuencia regular para analizar la variabilidad morfológica en el tiempo y espacio. A su vez que se analizaron los descriptores hidrodinámicos imperantes en la región para evaluar el efecto de cada variable en el transporte sedimentario y el cambio morfológico. Con los descriptores morfológicos, sedimentológicos e hidrodinámicos, se determinó el parámetro adimensional Omega y se analizó su variabilidad en espacio y tiempo. Los dos grupos de datos anteriores se analizaron en su conjunto para identificar los sitios de playa que requieren atención prioritaria dado su nivel de susceptibilidad a la erosión.

3.1 Geomorfología de playas

Para el estudio de la geomorfología de playas se emplearon dos perspectivas diferentes pero complementarias entre sí: 1) Descripción de los elementos paisajísticos como presencia de vegetación de duna, ancho de playa así como un análisis de las características de la línea de costa, incluyendo la posición de ésta en diferentes fechas, empleando técnicas de percepción remota con imágenes aéreas y 2) Levantamiento y análisis de la variación morfológica de perfiles de playa, empleando la nivelación topográfica con instrumentos ópticos (Bannister *et al.*, 2002; Compton, 1985).

Dado la importancia del papel que juega las características del sedimento en los procesos de transporte litoral, se realizó un muestreo de sedimento de la zona intermareal y sublitoral en la zona de swash y surf, y se efectuó un análisis granulométrico para complementar la descripción geomorfológica en cada perspectiva abordada.

3.1.1 Descripción de playas por teledetección

Los estudios de la línea de costa son facilitados cuando se tiene acceso a vistas panorámicas o sinópticas del litoral, por ello, las técnicas de percepción remota o teledetección representan una herramienta óptima para desarrollar una caracterización del litoral. Adicionalmente, al contar con imágenes de diferentes

fechas, permite identificar si existe algún tipo de tendencia de cambio en la costa, específicamente en la posición de la línea de costa, en la cobertura vegetal o en asentamientos humanos.

La descripción para esta primer etapa del estudio está basada en determinar el contexto en que las playas ocurren, esto es: 1) Tipo de litoral, si la costa es arenosa, rocosa, vegetada o artificial; 2) Ancho de playa; 3) Presencia de vegetación de duna; 4) Presencia de desarrollo antrópico; y 5) Orientación de la costa.

El procedimiento inició con la adquisición de imágenes aéreas de resolución espacial apropiada para realizar la descripción del contexto del litoral. La resolución requerida es aquella en la que sea posible distinguir los elementos de interés, como cobertura vegetal, desarrollo urbano, infraestructura marítima. El elemento que requiere mayor resolución es la identificación de la línea de costa y para su análisis de movimiento en diferentes tiempos es necesario contar con imágenes de alta resolución, esto es, al menos de 2m. Los registros de fotografía aérea o video aéreo con los que cuenta el Laboratorio de Percepción Remota, del CINVESTAV, Unidad Mérida, cuya adquisición proviene de diversas fuentes, se encuentran los grupos de imágenes y mosaicos para los requerimientos del presente estudio. Fotografía aérea (ortofotos de INEGI) de la costa de 2m de resolución espacial de 1995 a 2000; fotografía aérea a color de la costa de aproximadamente 1m de resolución espacial del 2003 del proyectos de playas de CINVESTAV-SEMARNAT-CNA y fotografía aérea a color de la costa de aproximadamente 1m de resolución espacial del 16 de

diciembre de 2004, del proyecto de playas de CINVESTAV-CNA-SEMARNAT (Tabla 1).

Tabla 1. Datos fuente para la descripción y análisis espacial de las playas por teledetección.

	Tipo de imagen	Fecha de registro	Cobertura	Resolución espacial	Fuente / Proveedor
1	Ortofoto en grises	1995-2000	Toda la costa	Aprox. 2m	INEGI
2	Fotografía a color	2003	Toda la costa	Aprox. 1m	CNA-SEMARNAT
3	Fotografía a color	2004	Sisal-Telchac	Aprox. 1m	CNA-SEMARNAT

Las imágenes CNA-SEMARNAT fueron ser georreferenciadas. Para este procedimiento se emplearon las ortofotos de INEGI, las cuales tienen una resolución espacial de 2m y tienen como datum geográfico el ITRF92, esencialmente igual al WGS84, mundialmente más utilizado. El sistema de referencia geográfico está en coordenadas UTM, el cual emplea una proyección cilíndrica transversa. Dado que este material fue utilizado como referencia, el resto de los materiales empleado, así como los nuevos productos generados mantuvieron los mismos parámetros espaciales y geográficos.

Con las imágenes más recientes se realizó la descripción del contexto en que las playas ocurren, como se mencionó anteriormente, consistió en determinar el tipo de litoral, la configuración costera (línea de costa), el ancho de playa, la presencia de vegetación de duna, así como la presencia de desarrollo urbano. Se generaron productos tipo vector y tipo raster en formato binario, para mostrar la presencia y ausencia de los distintos descriptores o se determinó el factor en distancia que lo caracteriza.

Un sistema de información geográfica permitió analizar la distribución espacial de grupos de variables. Se realizaron combinaciones y operaciones entre capas binarias o con superficies continuas de diferentes variables. A partir de fotointerpretación se determinó y generamos las capas correspondientes a los descriptores de playa. Dado que el interés del presente estudio es la tipificación de playas para determinar niveles de susceptibilidad a la erosión, se generaron los siguientes factores o capas que se considera tienen relación con la geomorfología de playas y la susceptibilidad a la erosión:

Línea de costa. Se empleó la línea de costa de la cartografía digital de INEGI en formato vectorial. Este objeto cartográfico sirvió de referencia para generación de capas y los respectivos corregristros para las operaciones y combinaciones del caso. El objeto vectorial fue rasterizado obteniendo una línea de píxeles sobre la línea de costa.

Tipo de litoral. Para la identificación del tipo de litoral a lo largo de la costa del estado de Yucatán, se empleó el software TNTmips 2007:73, de Microlimages, Inc. y con base en los fundamentos de fotointerpretación (Lillesand y Kiefer, 1987) sobre imágenes aéreas de alta resolución espacial (2m) del 16 de diciembre de 2004, georreferenciadas. Para la fotointerpretación y la generación de productos cartográficos se revisó digitalmente la costa del estado con un rango de escala entre 1:5000 a 1:20000. El reconocimiento de los objetos se basó en tamaño, patrones, colores y textura de cada objeto presente sobre la cobertura de suelo costero, específicamente sobre la línea de costa. Se reconocieron como tipo de litoral: arenoso, artificial, lodoso y vegetado. Cada segmento del litoral reconocido fue registrado sobre la línea de costa en formato vectorial asignando un identificador a cada segmento de litoral. Como resultado de la fotointerpretación se obtiene un objeto tipo vector con distintos valores, donde cada valor corresponde a un tipo de litoral. Este objeto vectorial se convirtió a un objeto raster de números reales con rango de 1 a 4.

Presencia de vegetación de duna. Para esta capa se empleó el mismo procedimiento descrito para la identificar el tipo de litoral, pero ahora reconociendo la presencia de vegetación sobre el área de duna. El objeto resultante es una capa vectorial con segmentos de línea de costa donde hay presencia de vegetación de duna. Este objeto vectorial se convirtió a un objeto raster binario, donde 1 indica la presencia de vegetación de duna.

Ancho de playa. Se generó un objeto vectorial reconociendo el límite en tierra adentro de playa arenosa (límite interior). Se creó una capa de proximidad partiendo de la línea que define el límite interior de playa. Posteriormente se extrajo el dato de distancia que coincide con la línea de costa, lo que corresponde a la distancia del límite interior de la playa a la línea de costa. El producto obtenido es un objeto raster con los valores de ancho de playa sobre la línea de costa.

Antropización. Este factor es importante por representar la presión humana sobre la playa como usuarios, así como la porción de infraestructura que representa la vulnerabilidad. Para éste factor se determinó el ancho de los asentamientos urbanos adyacentes a la línea de costa, usando el mismo método descrito para la determinación del ancho de playa, considerando en éste el límite de la cobertura urbanizada tierra adentro como límite interior. El producto obtenido es un objeto raster con los valores de ancho de antropización o de zona urbanizada, representado sobre la línea de costa.

Configuración costera (orientación de la línea de costa). La finalidad de obtener la configuración costera es conocer la orientación de la línea de costa respecto al norte, para posteriormente relacionarlo con el ángulo de incidencia del oleaje. La determinación de este factor consistió en determinar el aspecto topográfico de la playa, es decir, la dirección hacia donde está orientado el plano topográfico de la cara de la playa. Ante la falta de un modelo digital de elevación en la zona costera de la resolución requerida, se simuló esta topografía generando una capa de proximidad o distancia a partir de la línea de costa. A ésta capa se

enmascaró la porción sumergida y se estimó el aspecto topográfico como si fuera una capa de elevación topográfica digital. Posteriormente se extrajo el valor del aspecto determinado sobre la línea de costa obteniendo como producto un objeto cartográfico tipo raster con el valor de orientación de la línea costa en grados azimutales.

Para la combinación de capas se empleó un método de combinación lineal ponderada, donde los factores son combinados aplicando un peso a cada uno los que genera un mapa de adecuabilidad (Eastman, 1995; Burrough y McDonnell, 1998). Este método es conocido como Evaluación MultiCriterio (MCE, por sus siglas en inglés). La ecuación que permite combinarlas para obtener el indicador multicriterio se define como:

$$S = \sum w_i x_i$$

Donde S es la adecuabilidad; w_i es el peso o ponderación al factor i. y x_i es el criterio estandarizado del factor i.

Dichas capas se generaron en una delgada franja en torno a la línea de costa en el área de estudio, en capas corregistradas entre ellas para poder ejecutar las operaciones necesarias. Para este estudio se empleó una estandarización lineal y se aplicó el mismo peso a cada variable.

3.1.2 Perfiles de playa

La mayoría de los estudios de playa concentran su atención en los cambios de la morfología de los perfiles de playa, los cuales representa el resultado adaptativo del efecto constante de la acción de los agentes de transporte. Una forma de entender y sintetizar la comprensión de la dinámica del perfil de playa es a través de la estimación del perfil de equilibrio, como lo propuso Dean en 1977. Muchos estudios determinan las constantes del perfil de equilibrio en condiciones disipativas como los estudios desarrollados por Boon y Green en 1985 (en Bernabeu et al., 2003). Dicho trabajo fue utilizado para caracterizar la morfología de los perfiles de playas, en islas del Caribe. Tal como señaló Bernabeu et al. (2003), quienes estimaron nuevamente las constantes propuestas por Dean y agregaron un término para condiciones reflectivas, en playas de España. Las constantes empleadas definen el perfil de playa y muestran una alta correlación entre la pendiente y el tamaño de grano, particularmente en el perfil de surf, la cual se define desde el nivel medio del mar en la línea de costa, hasta el punto de rompiente (Bernabeu et al., 2003).

Con base en los estudios de perfiles se caracterizaron los perfiles de playas en función de algunos descriptores fisiográficos a partir de los promedios en las diferentes épocas del año. Tales descriptores consistieron en determinar la pendiente en la cara de la playa, la altura de la berma, la distancia del ancho de playa, así como el tamaño de grano.

Para tal efecto, se levantaron perfiles topo-batimétricos (Bannister *et al.*, 2002; Compton, 1985) utilizando un nivel óptico que inicia a partir de la zona de duna, o bien, al frente de alguna propiedad o construcción, hasta la zona sumergida donde el estadal puede ser sostenido por una persona estando de pié. Generalmente, el límite de la zona sumergida lo determina la zona de rompiente. Este criterio permitió registrar la zona de surf, incluyendo la cara de la playa. Con el fin de que los perfiles en el tiempo puedan ser comparados unos con otros, cada perfil inicia desde un a referencia fija, estableciendo bancos de nivel al inicio de cada perfil. Los bancos de nivel son estructuras que muestran permanencia en el tiempo y estabilidad, como terrazas de casas o muros. En playas donde no hay infraestructura se construyeron monumentos de cemento o madera bien cimentados. Cada perfil inicia desde una referencia cuya posición geográfica y altura ortométrica fue determinada con un sistema de posicionamiento global diferencial. La distancia de muestreo a lo largo de cada perfil fue de forma sistemática con aproximadamente 3m entre cada dato. Adicionalmente, se registraron los rasgos fisiográficos sobresalientes, como son escarpes de dunas y otros cambios abruptos que se encontraban. Los 15 perfiles utilizados en el trabajo se distribuyen de acuerdo a la figura 5. Los cinco sitios en las playas de Chuburná (Zona A) tienen una separación aproximada de 1500 m entre ellos. En las playas del Puerto de Progreso (Zona B) 350 m y los localizados en las playas de Uaymitún (Zona C) de 1500 m. Las características de las series de datos analizados y presentados en este estudio se muestran en la Tabla 2. El número total de perfiles analizados es de 365 a lo largo de aproximadamente 35km de playas,

donde se presentan celdas y sub-celdas de transportes cuyos límites se encuentran definidos por infraestructuras portuarias y la propia configuración costera.

Para estimar el perfil promedio, desviación estándar y pendiente en la zona de swash, los datos de altura fueron interpolados linealmente a un intervalo constante. Se determinó el parámetro de forma A de la expresión del perfil de equilibrio propuesta por Bruun (1954) y Dean (1977) tipo $h=Ax^{2/3}$. Dicho parámetro de forma fue estimado con una regresión para cada perfil promedio y para cada una de sus temporadas climáticas. El estudio de tendencia erosiva/acumulativa en los perfiles está basado en el seguimiento en el tiempo de la posición de la línea de costa. La referencia a la línea de costa fue definida como la altura cero ortométrica.

El intervalo de muestreo fue bimestral, lo que permitió obtener seis perfiles al año. El acceso a la base de datos del Laboratorio de Procesos Costeros del CINVESTAV, permite contar con datos de perfiles de playa desde el año 2002, es decir que para el presente estudio se analizaron los cambios de perfiles de playa correspondiente a cuatro años de muestreo.

Los datos de los levantamientos topográficos de los perfiles de playa fueron graficados en distancia vs altura, a partir de la duna. Se estimó el perfil promedio y su respectiva desviación estándar. Se obtuvieron los perfiles promedio por épocas climáticas, correspondiente a temporada de secas, lluvias y nortes, así como promedios anuales. Se analizaron las tendencias de éstos, es decir, si se encuentran

en procesos erosivos o acumulativos. Una vez determinados los descriptores de los perfiles de playa se utilizaron para ser integrados en análisis posteriores.

Tabla 2. Número de perfiles topobatimétricos analizados.

	No. de perfiles	Fecha de inicio – Fecha de término	No. de ocasiones muestreadas	Total de perfiles muestreados
Zona A	5	02/2002- 07/2006	28	140
Zona B	5	10/2002- 07/2006	24	120
Zona C	5	04/2003- 07/2006	21	105
Total	15			365

3.1.3 Estudio granulométrico

Se tomaron muestras de sedimento a lo largo de los perfiles de playa para realizar un análisis granulométrico, en la zona de de la cara de la playa y la zona de surf. Las muestras fueron secadas y tamizadas en tamaños de tamices de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0 phi y las fracciones separadas por tamaño fueron pesadas con una balanza analítica de 0.001g de precisión. Los datos fueron graficados en papel logarítmico para obtener los percentiles que permitan estimar la media, mediana, desviación estándar (dispersión o sorteo), asimetría y kurtosis (Folk, 1966). Se realizó un análisis comparativo de los resultados granulométrico en espacio y tiempo.

3.2 Oleaje, corrientes y viento

La dinámica de fluidos que actúan en la zona costera es descrita a través de los descriptores de los agentes de transporte. Tales agentes de transporte consisten en oleaje, viento y corrientes. De los registros, se estimaron sus estadísticos descriptivos.

Para coleccionar los datos se instaló a una profundidad de 5 m un perfilador acústico doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profilers), de tres haces que operan a 1500Hz para medir la velocidad y la dirección de la corriente en 3D y un sensor de presión para medir el oleaje y la marea. El equipo fue fijado a una estructura metálica piramidal de 50cm de alto que le proporciona estabilidad. El instrumento cuenta con un sensor de temperatura para compensar los cambios de la velocidad del sonido. También cuenta con un compás para ubicar el Norte magnético y lo establece como la dirección de cero grados. Ambos instrumentos fueron programados para realizar mediciones durante 5 minutos de forma continua, lo que le permite realizar 300 mediciones, una por segundo (1Hz) cada hora y almacenar en una memoria interna los valores promedio. Se eligió el sistema de ENU (East-North-Up) para el registro de la dirección de la corriente.

La tipificación del oleaje se determinó con los parámetros H_s (m) y T_p (s) que describen la altura promedio de ola del tercio de alturas mayor y el período pico de los trenes de olas. Los descriptores de oleaje se obtuvieron con un sensor de presión instalado en un en el ADCP, con una precisión de 0.1%. El equipo fue fijado a una

estructura metálica piramidal de 50 cm de alto e instalado a una profundidad de 5 m. La localización del instrumento respondió a facilidades logísticas y la homogeneidad del fondo de la plataforma de Yucatán así como la dirección dominante del oleaje permite asumir que las características registradas por el instrumento aplican en general para el área de estudio. El muestreo comprendió un total de 22 meses entre marzo de 2004 a octubre de 2006. Por motivos de mantenimiento del equipo suspendió el registro en 3 meses en 2004 y 6 meses en 2005. El instrumento fue programado para realizar mediciones continuas durante los primeros 5 minutos de cada hora a una frecuencia de 1Hz (300 mediciones por cada hora) y almacenar en una memoria interna los valores promedios de Hs (cm) y Tp (s) que describen la altura promedio de ola del tercio de alturas mayor y el período pico de los trenes de olas.

Se obtuvieron y analizaron las estadísticas descriptivas de los registros de viento colectados por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Se analizará su variación temporal para ser relacionada con los datos procesados de oleaje y los cambios morfológicos de los perfiles de playa. Los datos registrados en cada estación meteorológica convencional son lecturas manuales de veletas y láminas basculantes realizadas por un operario. Las lecturas son hechas diariamente a las 8:00 am. Las lecturas fueron capturadas a registros digitales estimando la dirección e intensidad dominante del viento por mes, a partir de enero de 1995 hasta julio de 2006.

Los datos de dirección fueron convertidos de clases a grados de dirección azimutal y la intensidad fue convertida de la escala de Beaufort a millas por hora. Los datos convertidos fueron importados al programa WRPLOT View, Wind Rose Plots for Meteorological Data, Versión 5.3. Lakes Environmental Software 1998-2006, para generar las rosas de los viento por temporada climática e insertarlos en un mapa que muestra su localización. La rosas de viento están en 8 clases de dirección y la velocidad del viento está en m/s. Las temporadas fueron definidas en ondas tropicales siendo éstas de mayo a octubre y Frentes fríos o "Nortes" de noviembre a abril.

Los datos de estaciones climatológicas automáticas en los poblados de Celestún, Mérida, Río Lagartos y el observatorio del Puerto de Progreso. Estos datos utilizan anemómetros digitales y registran el viento dominante y máximo cada 10 minutos. La serie comprende datos desde el año 2000 al 2006. Los datos fueron importados al programa WRPLOT para generar las rosas de los viento por mes, con rosas de 16 clases de dirección y la velocidad del viento está en m/s.

Las estaciones climatológicas disponibles y costeras son: Celestún, Chicxulub Puerto, Dzindzantun, Dzilam Bravo, El Cuyo, Río Lagartos, Sisal y Telchac Puerto. Sin embargo, la estación climatológica con instrumentos automatizados y de precisión más confiable son los de Mérida. Los datos empleados para generar los diagramas de rosas de los vientos dominantes por mes corresponden al período de enero de 1995 a julio de 2006.

3.3 Análisis de la morfodinámica de playas

Determinación de Ω . Se empleó la ecuación de condición de frontera de morfodinámica (MBC, Morphodynamic Boundary Condition) adaptada por Benedet *et al.*, (2004a) que identifica límites paramétricos y permite clasificar una playa en sus diferentes morfotipos. Empleando el parámetro Ω es posible identificar playas disipativas ($\Omega > 6$), intermedias (Ω entre 1 y 6) o reflectivas ($\Omega < 1$).

$$\Omega = H_b / W_s T$$

Donde

H_b es la altura de ola en rompiente (m),

W_s es la velocidad de asentamiento de la partícula (m/s),

T es el período de ola (s)

Los valores requeridos para la determinación de Ω , fueron estimados a partir de los datos de oleaje estimados con el sensor de presión del ADCP y de los resultados del análisis de granulometría. La estimación de la altura de ola en zona de rompiente (H_b) se realizó a partir de la fórmula propuesta por Komar y Gaughan (1972), utilizando los registros de oleaje del sensor de oleaje.

$$H_b = 0.56 H_o (H_o / L_o)^{-1/5}$$

Donde

H_o es la altura de ola en aguas profundas (m).

L_o es la longitud de ola en aguas profundas (m).

Los valores de altura y longitud de ola en aguas profundas (H_o y L_o respectivamente) fueron estimados a partir de los datos del ADCP y empleando las fórmulas propuestas en USACE (1984).

$$L_o = g T^2 / 2\pi$$

$$L_o = g 1.56 T^2 \text{ m}$$

Para determinar la velocidad de asentamiento de la partícula (W_s) se empleó la fórmula de Toledano y Silva (2005) quienes trabajaron con arenas de playa de la región a la que pertenece el área de estudio, con arenas finas biogénicas carbonatadas y basados en Bruun (1954) y Dean (1977), para partículas carbonatadas cuya mediana (D_{50}) está entre 0.1 y 1mm:

$$W_s = 273 * D_{50}^{1.1}$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Geomorfología

La descripción geomorfológica de las playas en la zona de estudio fue realizada aplicando fotointerpretación empleando como referencia la fotografía aérea a color con fecha de 16 de diciembre de 2004. La caracterización y tipificación de la costa se realizó en función los siguientes criterios: 1) Tipo de litoral, esto es, si la costa es arenosa, rocosa, vegetada o artificial; 2) Ancho de playa; 3) Presencia de vegetación de duna; 4) Presencia de desarrollo antrópico; y 5) Orientación de la costa.

4.1.1 Tipificación de la costa por teledetección

A partir del análisis y fotointerpretación del material fotográfico de CINVESTAV-CNA-SEMARNAT, registrado en un vuelo de baja altitud sobre una sección del litoral de Yucatán el día 16 de diciembre de 2004, se generaron imágenes digitales georreferenciadas utilizando de referencia las ortofotos de INEGI con datum geográfico ITRF92, con una resolución espacial de aproximadamente 1m. Esta resolución y definición de imágenes permitieron reconocer, con un escaso margen de duda, los elementos presentes adyacentes a la litoral marino y lagunar. De manera sistemática se identificó y cartografió en objetos vectoriales georreferenciados características como costa arenosa, rocosa, vegetada o artificial,

así como una estimación cuantitativa de algunas características complementarias de la franja de playa, como el ancho de ésta, orientación de la configuración costera y un inventario de estructuras de protección o estabilización de la línea de costa.

Tipo de litoral

En la figura 6 se observa que la franja costera estudiada presenta en su litoral marino una dominancia de costa arenosa, y dado que este material sedimentario es controlado principalmente por oleaje se considera como sistema de playas. El segundo componente del litoral marino es el artificial, el cual es encontrado en las zonas de navegación y refugios portuarios, para lo cual se ha estabilizado éste con construcciones portuarias como escolleras y muros de contención. El muelle de Progreso se determinó en esta caracterización como litoral artificial ya que su sección distal (extensión del muelle) fue construida con un relleno rocoso, lo que le confiere características de un litoral por fungir como una barrera física entre mar y tierra. Sólo de manera complementaria, se observa que los cuerpos lagunares presentan una dominancia de litoral vegetado.

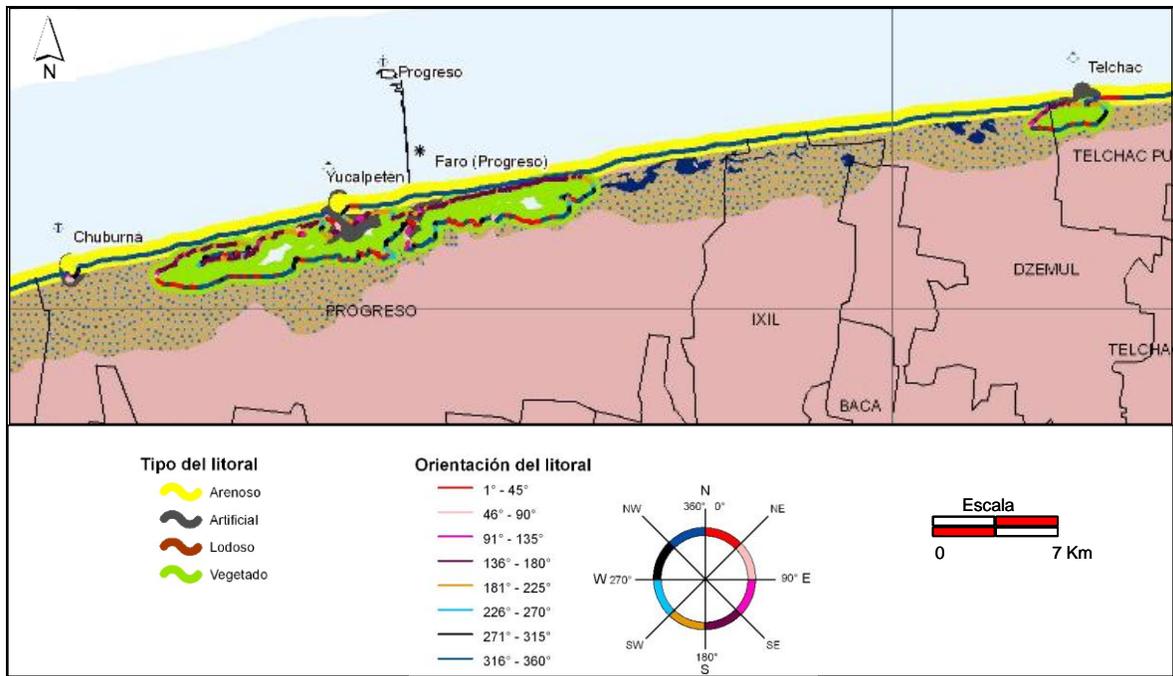


Figura 6. Tipo y orientación del litoral estudiado basado en la fotografía aérea de Diciembre de 2004.

Ancho de playa

El ancho de playa fue determinado a partir del material fotográfico más reciente. El resultado se expresó en una capa vectorial tipo línea con tres categorías (Figura 7). Los segmentos de costa en rojo representan anchos de playa menores a 10m, en amarillo entre 10 y 25m, y en verde los anchos de playa mayores a 25m. En general, la costa estudiada se encuentra dominada por anchos de playa entre 10 y 25m, se considera que aquellos anchos de playa escasos contribuyen con la susceptibilidad a la erosión, poniendo en riesgo las propiedades adyacentes.

Los segmentos de costa en verde se observan en la zona mejor vegetada de Chuburná, próximo a la escollera de este puerto. El playón de Progreso también muestra una zona amplia de playa, donde se registran más de 40m de ancho de playa. Otros tres tramos costeros con playas amplias son uno en Ixil y dos cercanos al Puerto de Telchac, específicamente corresponden a las playas de San Benito y playas de San Bruno (Figura 7).

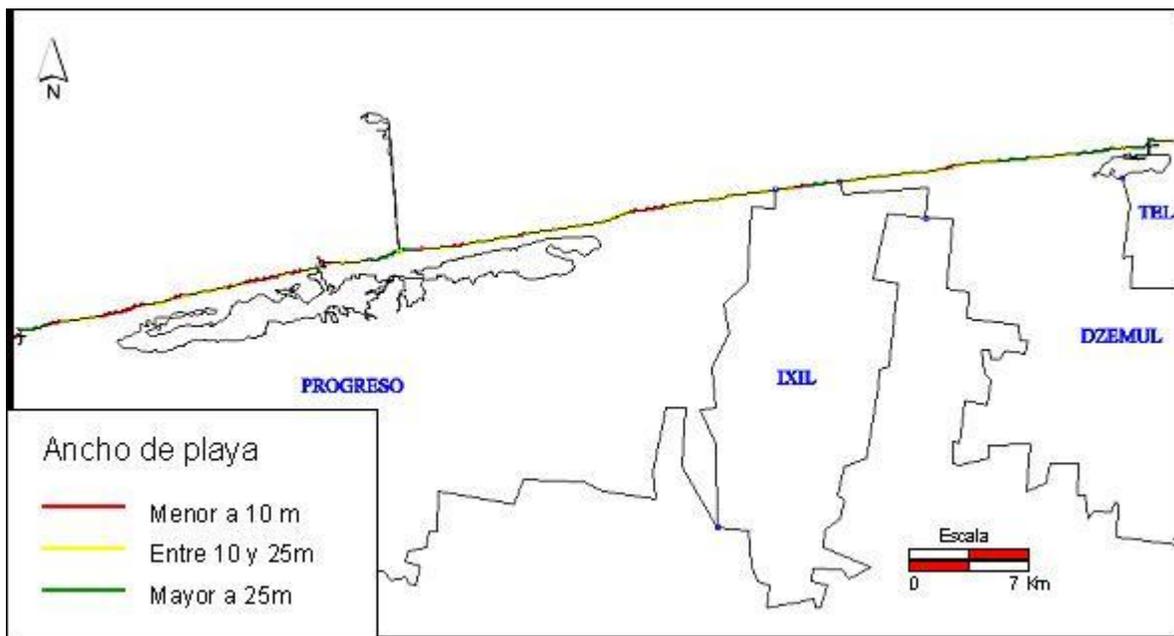


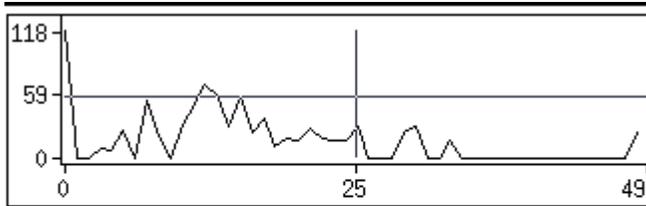
Figura 7. Ancho de playa basado en la fotografía aérea de Diciembre de 2004. Los segmentos de costa en rojo representan anchos de playa menores de 10m, en amarillo entre 10 y 25m y en verde mayores de 25m.

En la figura 8 se muestran dos ejemplos con acercamiento suficiente para apreciar la caracterización geomorfológica de la playa. En la fotografía superior, que corresponde a Chuburná, se observa desde la escollera del mismo puerto hasta el poblado. La línea de color verde muestra la zona de acumulación de arena atrapada por efecto de la escollera y se reduce el ancho de playa drásticamente por la presencia de una punta vegetada y frente al poblado se recupera moderadamente el ancho de playa. En el caso de la fotografía inferior de la misma figura, corresponde a la zona del malecón de Progreso. En ésta se observa un ancho de playa mayor a 25m frente al malecón, hacia el muelle de altura, pero esta playa disminuye rápidamente su ancho hacia el remate este del malecón donde el ancho de playa es menor a 10m. Hacia el este, en ausencia del malecón, el ancho se recupera moderadamente.



Figura 8. Fotografía aérea de diciembre de 2004 con la línea de estimación de ancho de playa. El código de color de línea es explicado en la figura anterior. La fotografía superior corresponde a la zona adyacente a la escollera de Chuburná. La fotografía inferior corresponde a la playa de Progreso, frente al Malecón. La posición de la línea de costa es la determinada por INEGI a partir de la ortofoto.

Resumiendo la descripción de esta capa, se observa que el 31.8% muestra un ancho de playa igual o menor a 10m; 56.9% de playa presenta un ancho entre 10 y 25m; sólo el 11.3% presentó un ancho mayor de 25m. El ancho promedio fue de 14.5m (Figura 9, Tabla 3).



Raster: Ancho_Playa20 16-bit signed
Minimum: 0 Maximum: 49
Mean: 14.5006 Std Dev: 10.4568
Median: 13 Mode: 0 Most: 119
Cell Count: 843 Bin Interval: 1 Sample: 2 by

Figura 9. Histograma de frecuencias de los valores de ancho de playa obtenido de la capa raster de 20m de resolución espacial.

Tabla 3. Tabla de frecuencias por píxel procesado para determinar el ancho de playa

Ancho de playa Valor del píxel (m)	Cuenta de píxeles	Área (m ²)	% de litoral	% acumul.
0	119	47600	14.12%	14.12%
3	10	4000	1.19%	15.30%
4	7	2800	0.83%	16.13%
5	26	10400	3.08%	19.22%
7	53	21200	6.29%	25.50%
8	21	8400	2.49%	28.00%
10	32	12800	3.80%	31.79%
11	46	18400	5.46%	37.25%
12	68	27200	8.07%	45.31%
13	60	24000	7.12%	52.43%
14	30	12000	3.56%	55.99%
15	58	23200	6.88%	62.87%
16	25	10000	2.97%	65.84%
17	37	14800	4.39%	70.23%
18	11	4400	1.30%	71.53%
19	19	7600	2.25%	73.78%
20	17	6800	2.02%	75.80%
21	27	10800	3.20%	79.00%

22	19	7600	2.25%	81.26%
23	17	6800	2.02%	83.27%
24	17	6800	2.02%	85.29%
25	29	11600	3.44%	88.73%
29	25	10000	2.97%	91.70%
30	29	11600	3.44%	95.14%
33	16	6400	1.90%	97.03%
49	25	10000	2.97%	100.00%
Total	843		100.00%	

Las playas que presentan menor ancho se encuentran asociadas a zonas urbanizadas como es el caso de Chuburná y Chelem. Hacia el oeste, los tramos de menor ancho de playa se observan en el extremo este del malecón de Progreso, en Chicxulub y en dos puntas, en Tropical Riviera y entre Uaymitún y San Benito. Los segmentos de costa más extensos con menor ancho de playa son los dos últimos mencionados, presentando longitudes de 1.5 km y 1km respectivamente. Y en las playas al este del poblado de Chuburná con 2km de extensión y al este de Chelem con 1.5km.

Presencia de vegetación de duna

La alta resolución espacial de la fotografía aérea permitió reconocer con mucha certeza la presencia de vegetación de duna. En general, se observó el 43.9% de presencia de vegetación de duna a lo largo del litoral estudiado, y el resto (56.1%) de litoral sin vegetación de duna. En la porción este del litoral, se observa escasa

cobertura de vegetación de duna, en gran medida por el grado de antropización, en contraste a la porción oeste, donde la presencia de vegetación de duna es dominante (Figura 10). Si bien se observa una relación, estas variables no son mutuamente excluyentes.

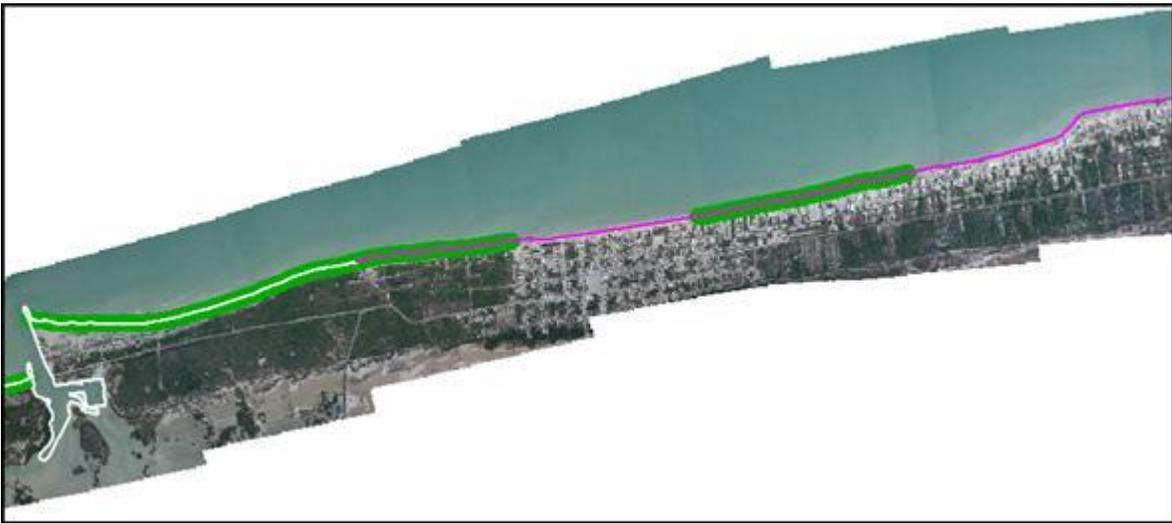


Figura 10. Representación de la presencia de vegetación de duna y la antropización de costa a lo largo de la playa estudiada. Detalle de la zona de Chuburná.

Antropización

La presencia de algún tipo de urbanización o antropización, resulta muy evidente con imágenes aéreas o satelitales de baja resolución. Esto debido a que los desarrollos antrópico muestran una reflexión alta y formas geométricas regulares. Sólo en aquellas zonas donde los desarrollos son menos intensos escapan a la

capacidad de las imágenes de baja resolución, lo que no sucedió con las imágenes empleadas en este trabajo. Prácticamente todo el litoral estudiado se encuentra con algún grado de urbanización, sin embargo, en la porción oeste es donde la densidad de casas y tamaño de la mancha urbana es considerablemente mayor (Figura 10). En resumen, el 75.8% del litoral se encuentra antropizado y sólo el 24.2% se presenta libre de algún tipo de urbanización. Sin embargo, dado que a mayor densidad poblacional, mayor es la presión recibida en el sistema de playa por visitantes y mayor la vulnerabilidad, se estimó la extensión o ancho de la zona urbanizada como la distancia de la línea de costa al límite interno del asentamiento urbano.

Orientación de la costa

En una primera vista de la orientación del litoral de costa, se observa que en el litoral marino, sistema de playas, la dominancia de la orientación es de nor-noroeste (315° a 0° y 0° a 10°). En la figura 11, se observa esta dominancia en el sistema de playas. En las secciones de playa que se localizan al este de las escolleras la orientación se encuentra al noreste. Esta orientación adquiere importancia al considerar el ángulo de incidencia del oleaje, y dado que el oleaje dominante en la zona presenta un ángulo de aproximación del noroeste. Por lo que incidiría de manera frontal a estas secciones. También se ha propuesto que el máximo transporte de sedimento en playas es cuando el ángulo que se forma de la línea de

costa y el ángulo de incidencia es de 45° , por lo que probablemente las zonas de mayor susceptibilidad a la erosión puede estar dado alrededor de los 315° de orientación.

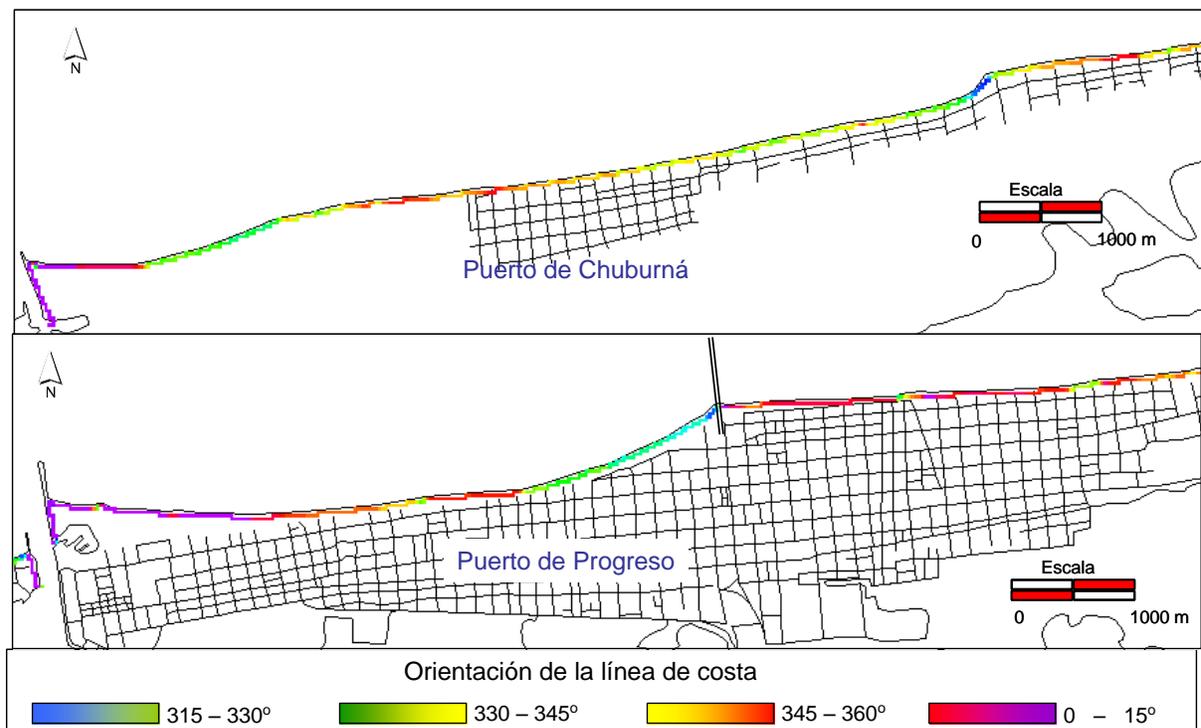


Figura 11. Orientación del litoral estudiado. La escala está ajustada a los valores presentes en la sección estudiada.

Otro aspecto importante de la orientación es que nos permitiría determinar las sub-celdas de transporte, considerando que éstas se encuentran delimitadas por

puntas. La identificación de estas sub-celdas auxiliará la explicación de los procesos que controlan la erosión (Figura 12).

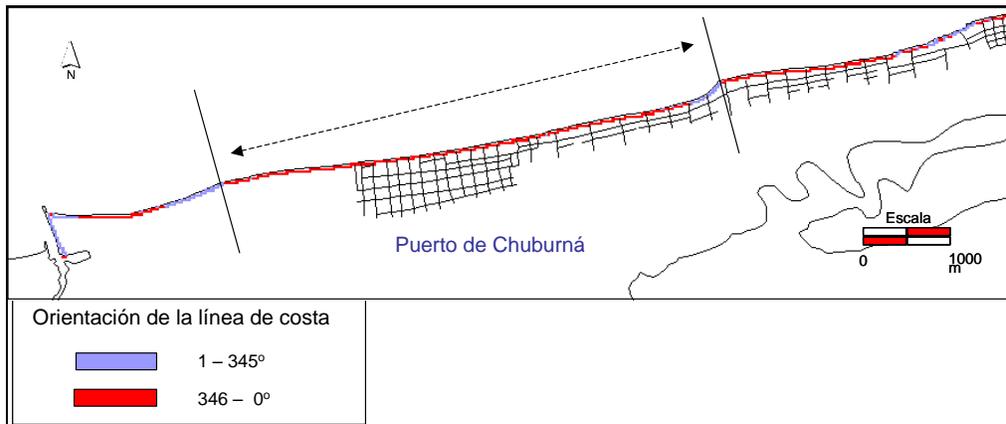


Figura 12. Orientación del litoral estudiado resaltando sub-celdas de transporte.

Combinación de capas

Los sistemas de información geográfica permitieron combinar las capas de ancho de playa, extensión de los asentamientos urbanos y vegetación de duna. Las capas fueron preparadas ajustando los parámetros espaciales para hacer posible la combinación de capas (corregistro) y también fueron estandarizadas. La estandarización consistió en llevarlas a una escala de 1 a 100, donde 1 representa lo menor susceptibilidad a la erosión costera y 100 la mayor susceptible. Los criterios para la estandarización de cada capa responden a la las características que cada factor aporta en el proceso de erosión. A una playa amplia aporta estabilidad, por

tanto su nivel de susceptibilidad. Una amplia extensión de asentamiento urbano se asocia a una mayor presión por actividad antropogénica, por tanto el nivel de susceptibilidad es mayor. Y la presencia de vegetación de duna aporta estabilidad al material sedimentario, por tanto indica una baja susceptibilidad. Se aplicó el método de Evaluación Multicriterio proporcionando el mismo peso a cada variable obteniendo como resultado una capa con distintos niveles de susceptibilidad a la erosión.

Considerando que la presión por actividades antropogénicas puede presentar el mismo nivel de presión mayor de 500m que la de 1000m se probaron dos casos. En el primero, en el primer caso la estandarización de la capa de extensión de asentamiento urbano fue de 1 a 1092 estandarizando linealmente de 1 a 100 (Figura 13) y el segundo caso, se estandarizó de 1 a 500m, asumiendo que a partir de 500m de extensión urbana ejerce la misma presión que 1000m (Figura 14).

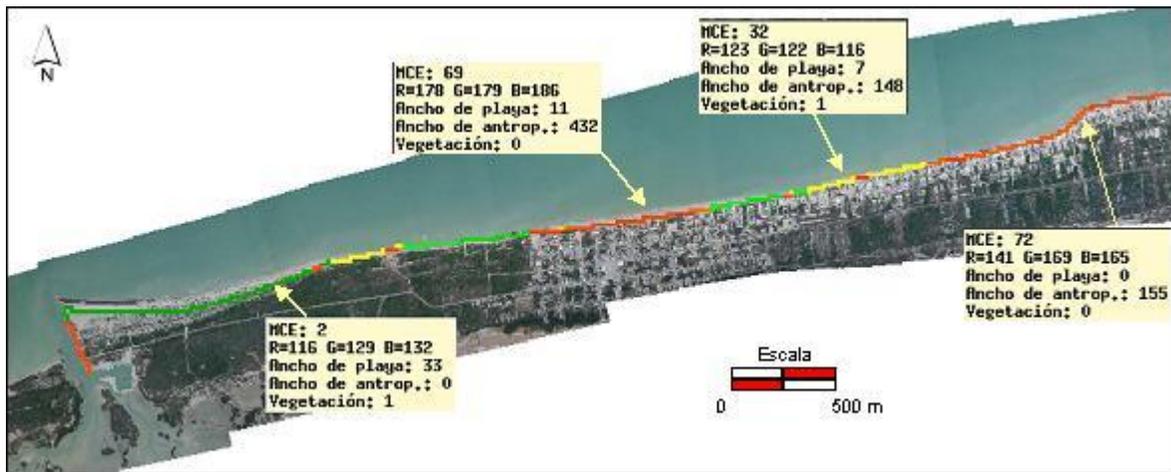


Figura 13. Tipificación de un segmento de playa en función del ancho de playa, presencia de antropización y presencia de vegetación de duna. En una escala de 0 a

50. Los cortes se realizaron en 0a 13; 14 a 30 y 31 a 45. A mayor valor, menos vulnerable.

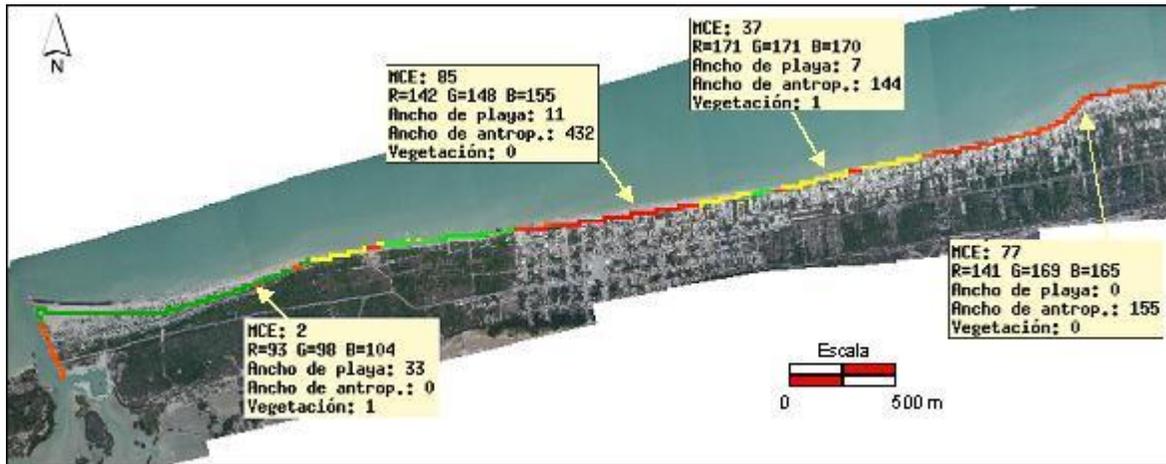


Figura 14. Tipificación de un segmento de playa en función del ancho de playa, extensión de asentamiento urbano y presencia de vegetación de duna. En una escala de 1 a 100. Los cortes se realizaron de 1 a 33 en tonos verde para la baja susceptibilidad; de 34 a 66 en tonos amarillos para mediana susceptibilidad; y de 64 a 100 en tonos rojos para alta susceptibilidad.

Los resultados obtenidos de la Evaluación Multicriterio adquieren valores entre 1 y 100, donde los valores mayores representan las condiciones de mayor susceptibilidad a la erosión. En la figura 15 se muestra la distribución de frecuencias de las capas de MCE. Esta agrupación permitió establecer tres niveles de susceptibilidad. De 1 a 33, baja susceptibilidad, de 34 a 66 moderadamente susceptible y de 64 a 100 alta susceptibilidad.

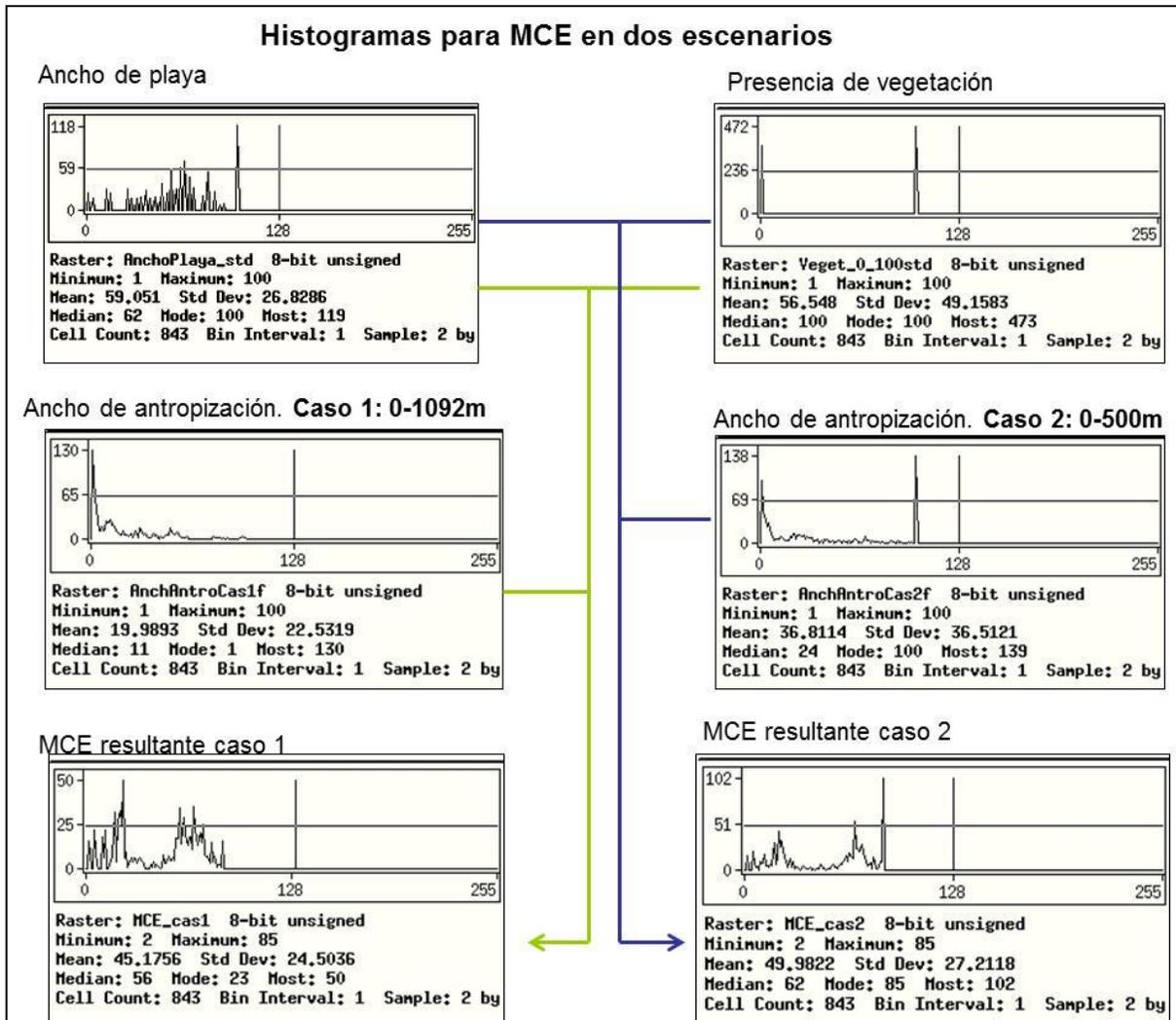


Figura 15. Histogramas de frecuencias de las capas aplicadas para generar el indicador de susceptibilidad (MCE).

La orientación no fue incluida en el proceso de integración de capas en el procedimiento de MCE para determinar la susceptibilidad, dado que la

susceptibilidad a la erosión asociada a la orientación de la línea de costa depende del ángulo de incidencia del oleaje y debido a que éste varía en el tiempo, es difícil estandarizar la variable de orientación de la línea de costa en función de una escala de susceptibilidad. Sin embargo, se procedió a explorar una correlación entre la vulnerabilidad estimada con las capas empleadas y el valor de orientación y se obtuvo una correlación de -0.89 .

4.1.2 Perfiles de playa

Los levantamientos topobatimétricos iniciaron con el proyecto de Erosión Costera y Calidad del Agua (ECCA) a partir de diciembre de 2001, pero fue a partir de febrero de 2002 cuando iniciaron los registros de manera sistemática (Tabla 4). Los primeros sitios fueron cinco perfiles en las playas de Chuburná con una distancia aproximada de 1.5km entre ellos. En octubre del mismo año inició el levantamiento de 10 perfiles topobatimétricos en playas del Puerto de Progreso, específicamente 5 frente al malecón de Progreso y 5 más al este del mismo malecón, con una distancia entre ellos de aproximadamente 150m. En abril de 2003, inició el levantamiento de 5 perfiles en las playas de Uaymitún y en febrero de 2005 inició el levantamiento de 10 perfiles distribuidos a lo largo de las playas de Chelem, Yucalpetén, oeste del Puerto de Progreso y Chicxulub. Tanto los de Uaymitún y los de Chelem a Chicxulub están a una distancia entre ellos de aproximadamente a 1.5km. Los datos analizados y presentados en este estudio son hasta el julio de 2006, sin embargo los

levantamientos de los perfiles de playa continúan hasta la fecha. Por tanto, el número de perfiles analizados es de 700 en una franja costera de aproximadamente 40km

Tabla 4. Número de perfiles topobatimétricos analizados.

	No. de perfiles	Fecha de inicio – Fecha de término	No. de ocasiones muestreadas	Total de perfiles muestreados
Zona A	5	02/2002-07/2006	44	220
Zona B	5	10/2002-07/2006	31	155
Zona C	5	04/2003-07/2006	20	100
Total	15			475

A lo largo de estos 400km se presentan celdas y sub-celdas de transportes cuyos límites se encuentran definidos por infraestructura portuaria. Las más importantes son, de oeste a este, la Escollera de Chuburná, las escolleras de Yucalpetén, el muelle de altura de Progreso, Escolleras de Telchac. Estos límites determinan prácticamente tres secciones costeras: Chuburná Chelem, el Playón de Progreso y del Muelle de Altura a Telchac. La primera sección (Chuburná-Chelem, zona A) están establecidos 5 perfiles de playa y se observan 5 puntas costeras. En la segunda sección, zona B, caracterizada por 5 perfiles, se encuentran a una distancia de 150m entre ellos. En la tercera sección, zona C, en Uaymitún, se cuentan con 5 perfiles para su caracterización. Las coordenadas de cada perfil se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas UTM y altura ortométrica con GPS diferencial (Datum WGS84) de los sitios de referencia para levantamientos topobatimétricos.

Sitio	Easting (m)	Northing (m)	Altura ortométrica (m)
A5	212555.107	2354071.962	1.47
A4	210383.618	2353553.712	2.317
A3	209283.619	2353208.415	1.658
A2	207592.834	2352896.391	2.47
A1	205490.612	2352478.320	2.065
B1	223839.272	2356376.837	2.539
B2	224171.168	2356405.615	2.165
B3	224506.378	2356431.165	2.382
B4	224925.493	2356437.037	3.008
B5	225068.972	2356448.269	2.565
C1	235256.725	2358315.813	2.312
C2	236607.051	2358534.286	1.793
C3	238251.048	2358769.874	2.330
C4	239631.805	2358971.308	2.048
C5	241234.321	2359214.530	2.059

Perfil promedio de playa

Los datos topobatimétricos fueron interpolados a cada 10cm, esto permitió promediar los datos y estimar una desviación estándar a lo largo perfil de tierra a mar. El perfil promedio también permite visualizar la forma del perfil de cada sitio y realizar comparaciones. La desviación estándar muestra la variación de altura a lo largo del perfil y se observa consistentemente que la zona de mayor variación está asociada a la zona intermareal.

En la figura 16 se muestran los perfiles topobatimétricos promedio y su respectiva desviación estándar a lo largo del perfil, correspondiente a las zonas A, B y C. Son sitios contrastantes ya que en el primero se encuentra en el extremo oeste del litoral estudiado y se trata de una playa sin desarrollo antrópico y con una amplia área de duna vegetada. Su proximidad a la escollera de Chuburná la caracteriza por mostrar tendencia a la acumulación de material sedimentario. La zona B corresponde al puerto de Progreso, un área con desarrollo y dada la importancia de visitantes, se ha atendido con alimentación artificial de arena. La zona C en el extremo oriente del área de estudio, presenta menor presión antropogénica.

En todas estas playas, la desviación estándar de la altura escasamente supera los 0.6m a excepción del perfil A4 (0.9m), sitio donde se encontraba un espigón que generó una amplia playa y que por acciones de manejo fue retirado en el 2002, lo que provocó una importante pérdida de playa a pesar de la alimentación artificial de arena aplicada en ese sitio. El menor valor de desviación estándar fue registrado en el perfil C2 con 0.3m. En una zona correspondiente al extremo este del área de estudio, área de baja densidad poblacional y con menores acciones de manejo.

En los perfiles correspondientes a la zona A, siendo aquellos del extremo oeste del litoral estudiado, se encuentra una playa sin desarrollo antrópico y con una amplia área de duna vegetada (A1). Su proximidad a la escollera de Chuburná lo caracteriza por mostrar tendencia a la acumulación de material sedimentario. La zona A muestra las mayores desviaciones del área estudiada, mayores a 0.5, es

decir, la mayor variabilidad, y ésta de manera consistente, se presenta en la zona de swash. En el sitio A4 se encontraba un espigón que generó una amplia playa y que por acciones de manejo esta estructura fue retirada en el 2002 lo que provocó una importante pérdida de playa. Los perfiles de la zona B correspondiente al centro del área de estudio presenta los menores valores de desviación estándar en la zona de swash, siendo menores a 0.4, en particular en los perfiles B1, B2 y B3, los cuales se encuentran frente al malecón de progreso, se encuentran bajo un programa de relleno de playa. En la zona C, correspondiente al extremo este del área de estudio, es un área de baja densidad poblacional y menor manejo de playa. Los valores de desviación estándar oscilan en el orden de 0.5 y pendientes en la zona de swash son muy uniformes.

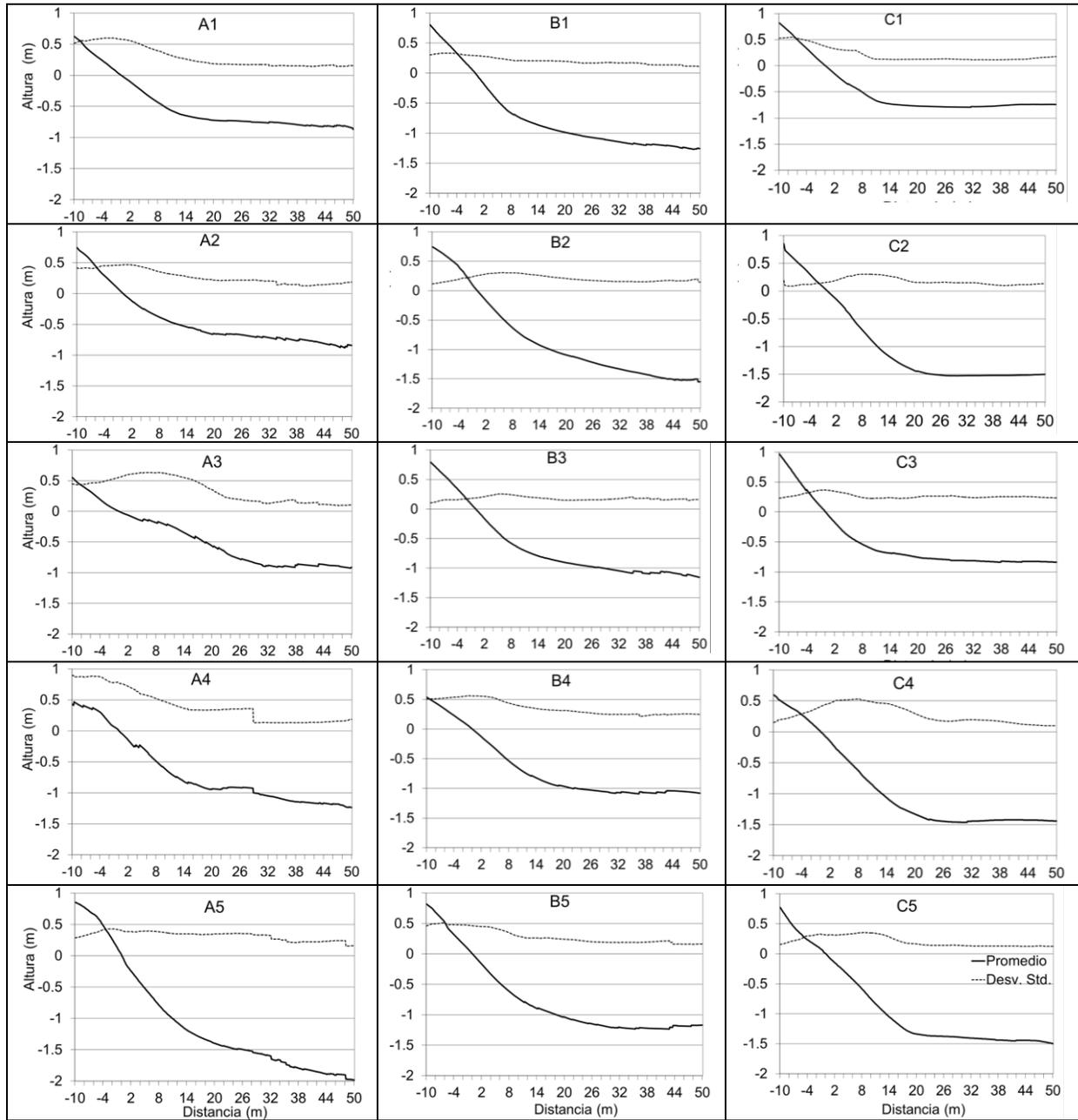


Figura 16. Perfil promedio de perfiles topobatimétricos con su respectiva desviación estándar a lo largo del perfil de cada sitio de muestreo.

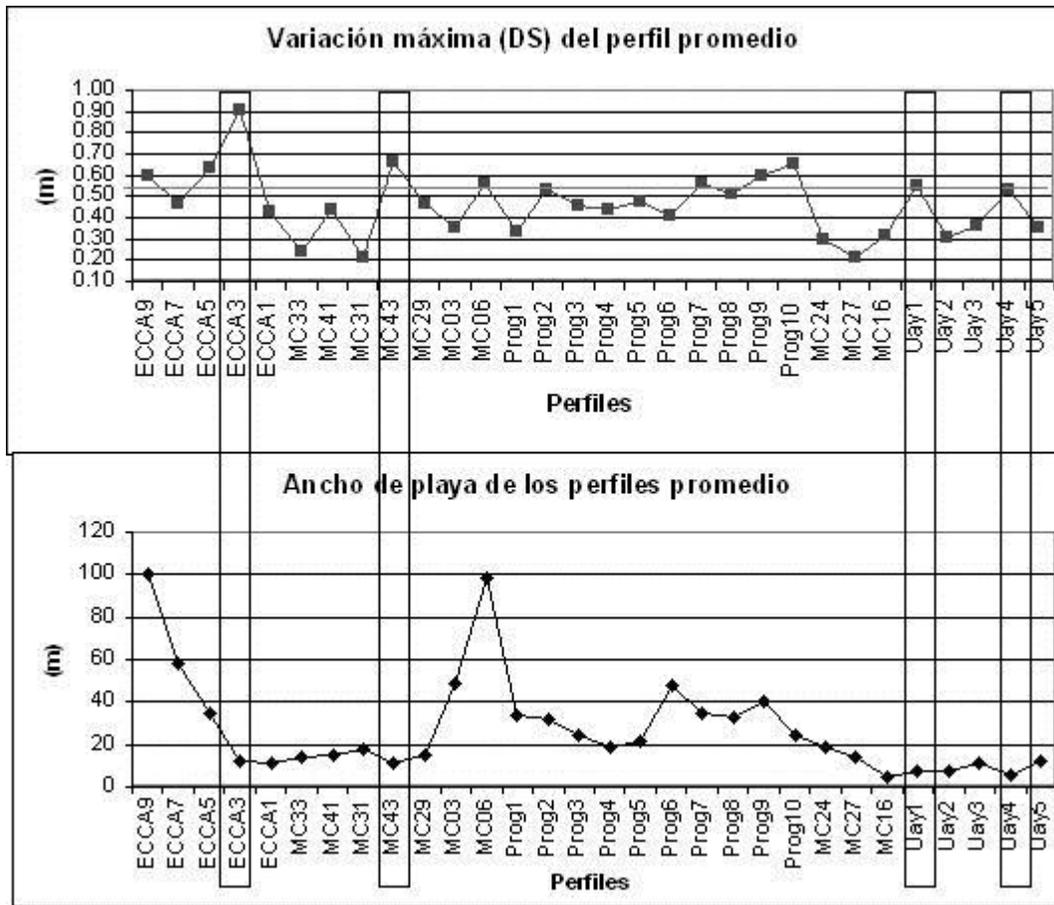


Figura 17. Desviación estándar máxima de los perfiles promedio y el ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006). En los recuadros se muestra los perfiles de mayor variación y anchos de playa menores de 20m.

En la figura 17, se muestran dos graficas, la desviación estándar máxima de cada perfil como indicador de variabilidad y en el ancho de playa registrado en la última fecha de levantamiento topobatimétrico. Se resaltan en rectángulos verticales aquellos perfiles que presentan variaciones altas y anchos de playa angostos. Se observa que el A4, C1 y C4 serían playas de alta susceptibilidad. Las playas

indicadas muestran una alta variación y ante la evidencia de ser playas angostas se sugiere que representan una alta susceptibilidad a la erosión. Los cuatro sitios presentan algún nivel de antropización, en especial A4, mientras que en la zona de Uaymitún la densidad de propiedades es menor. En particular en el sitio de C4 se presenta vegetación de duna, por lo que, de las playas en riesgo, ésta muestra la menor susceptibilidad.

Los casos opuestos son los A1, A2 y C3, consideradas como playas con baja susceptibilidad, donde sus variaciones son pequeñas pero sus anchos de playa son suficientemente amplios para soportar esas magnitudes de variación. En esta lista de playas menos susceptibles pueden incorporarse el sitio A1, porque si bien presentan alta variabilidad sus anchos de playa son los más amplios del área de estudio y la proporción de su variación no pone en riesgo los ecosistemas o propiedades adyacentes a estas playas.

Parámetro de forma A

Los valores del parámetro A de los perfiles promedio se muestran en la Tabla 6. Se observa que los valores de este parámetro se presentaron entre -0.1863 y -0.904. También se observó que los valores mayores del parámetro A se presentan en perfiles someros o de acumulación, correspondiente a los cercanos a la escollera

de Chuburná (A1, A2 y A3). Respecto a la variación de A, en relación a las épocas climáticas, se observó consistentemente que los valores menores se presentan en época de nortes. En la figura 18 se observan los perfiles promedio con las estimaciones del perfil de equilibrio tipo $h=Ax^2/3$. En la zona A se observa mayor heterogeneidad entre perfiles, presentando aquellos cercanos a la escollera de Chuburná, en el extremo oeste, pendientes más suaves, en relación al perfil A5 localizado en el extremo este de la zona A. Los perfiles de la zona B son más homogéneos entre ellos con pendientes intermedias. Los perfiles de la zona C muestran pendientes más pronunciadas.

Tabla 6. Valores del parámetro de forma A del perfil de equilibrio $h=Ax^2/3$.

Sitio	promedio	nortes	secas	lluvias
A1	-0.0998	-0.0977	-0.0958	-0.1032
A2	-0.0904	-0.0743	-0.0827	-0.0993
A3	-0.1003	-0.1007	-0.1072	-0.1007
A4	-0.1284	-0.1258	-0.1281	-0.1318
A5	-0.1805	-0.1787	-0.1737	-0.2023
B1	-0.1334	-0.1256	-0.1341	-0.1431
B2	-0.1512	-0.1384	-0.1492	-0.1642
B3	-0.1230	-0.1175	-0.1195	-0.1324
B4	-0.1266	-0.1125	-0.1185	-0.1462
B5	-0.1405	-0.1301	-0.1445	-0.1462
C1	-0.1862	-0.1860	-0.1819	-0.1876
C2	-0.1858	-0.1841	-0.1807	-0.1940
C3	-0.1831	-0.1816	-0.1804	-0.1861
C4	-0.1863	-0.1865	-0.1817	-0.1920
C5	-0.1680	-0.1722	-0.1624	-0.1713
Promedio	-0.1456	-0.1408	-0.1427	-0.1534

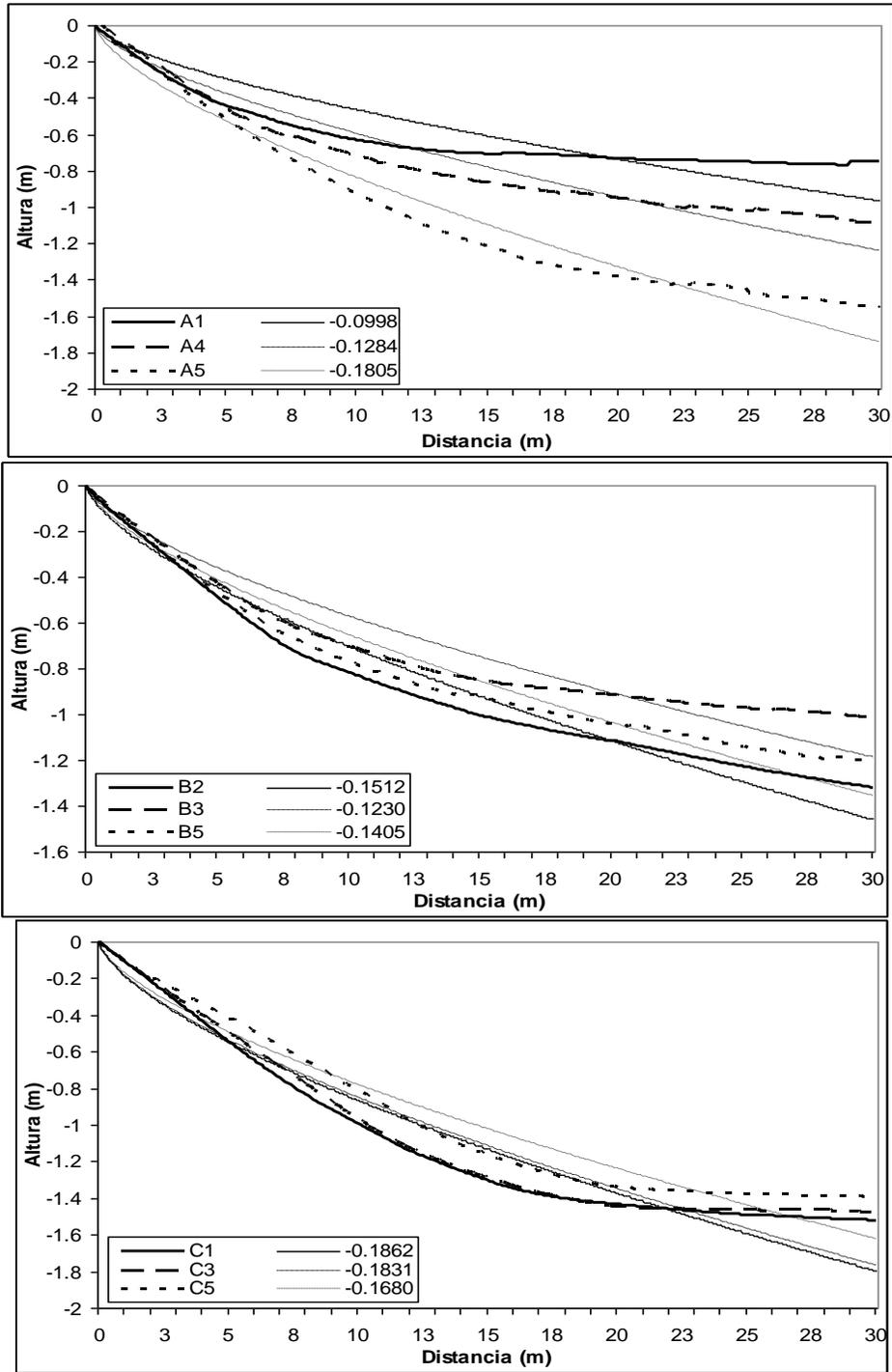


Figura 18. Perfil promedio de la zona de swash y surf de las tres zonas estudiadas (A, B y C) con la estimación del perfil de equilibrio tipo $h=Ax^2/3$. En la leyenda se muestra el valor del parámetro A para los perfiles graficados.

Evolución de perfiles y cambio

Se aplicó una estimación de diferencias en topográficas entre tiempos una vez que los perfiles fueron interpolados cada 10cm. Los resultados fueron graficados en diagramas 3D. La imagen resultante permite, de manera sintética, visualizar la evolución de cada perfil. En la figura 19 se muestran los perfiles de Chuburná y se observa que cada uno ha tenido una evolución diferente, por motivos diversos asociados al clima marítimo, a su geomorfología y a respuesta por acciones de manejo.

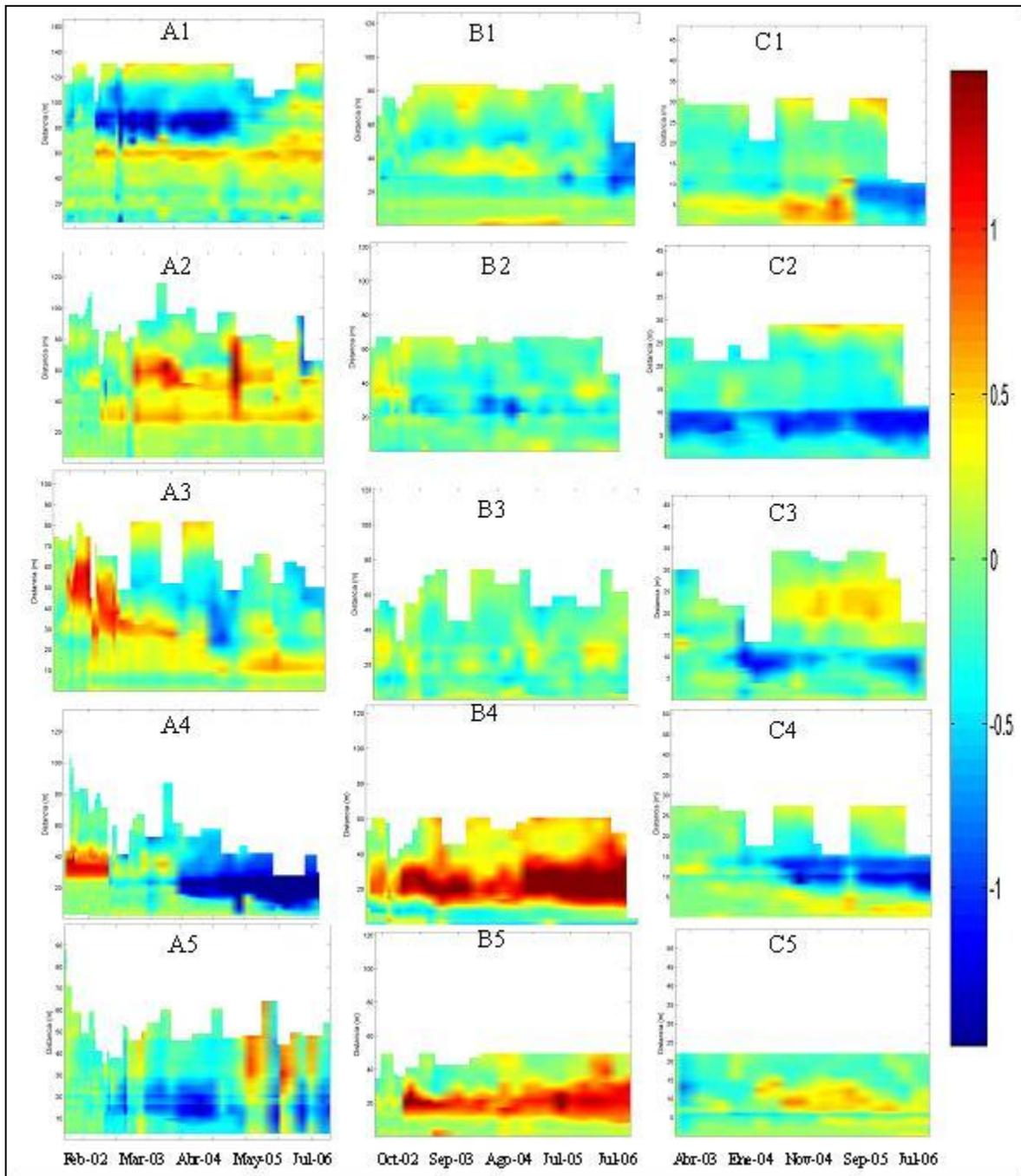


Figura 19. Evolución de los cambios de perfiles topobatimétricos a partir del perfil inicial.

Pendiente en zona de swash

A partir de los datos de los perfiles interpolados se estimó la pendiente en la zona de swash. Como lo muestran las desviaciones estándares de los perfiles promedio de playa, esta zona es la más dinámica de la playa.. En la figura 20 se muestra la variabilidad de la pendiente a lo largo del tiempo en dos sitios, A5 y A1. De manera consistente, se observan dos picos en cada año, al término de la temporada de nortes y en la temporada de tormentas tropicales. Los valores menores están relacionados con la temporal de secas, mayo y junio y al termino de la temporada de tormentas tropicales.

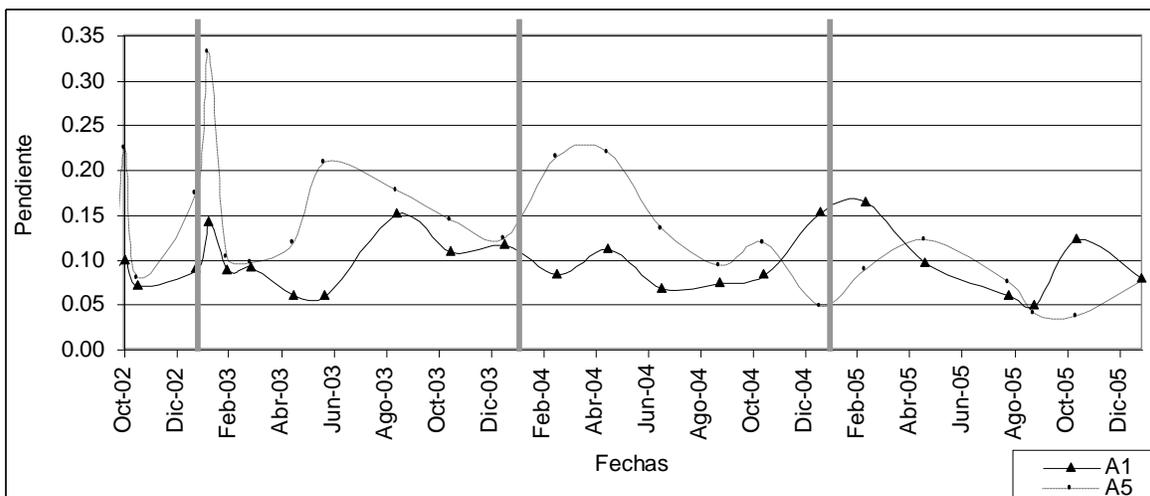


Figura 20. Variabilidad temporal de la pendiente en la zona de swash en los perfiles A1 y A5. Las líneas verticales en la gráfica muestran el fin de cada año, para asociar la temporada de nortes.

Los casos mostrados en la figura 20 corresponden a una zona sin urbanización (A1) y una urbanizada (A5). En ambos casos se observa el comportamiento que asocia valores de pendiente bajos durante la temporada de nortes, los cuales se presentan de manera dominante de noviembre a febrero, y durante la temporada de secas y lluvias, los valores aumentan. En la figura 21 se puede apreciar el comportamiento de los sitios estudiados. Respecto a las diferencias de pendiente entre las cada época climática se observa que durante la época de nortes, las pendientes tienden a ser menores que las pendientes durante las ondas tropicales.

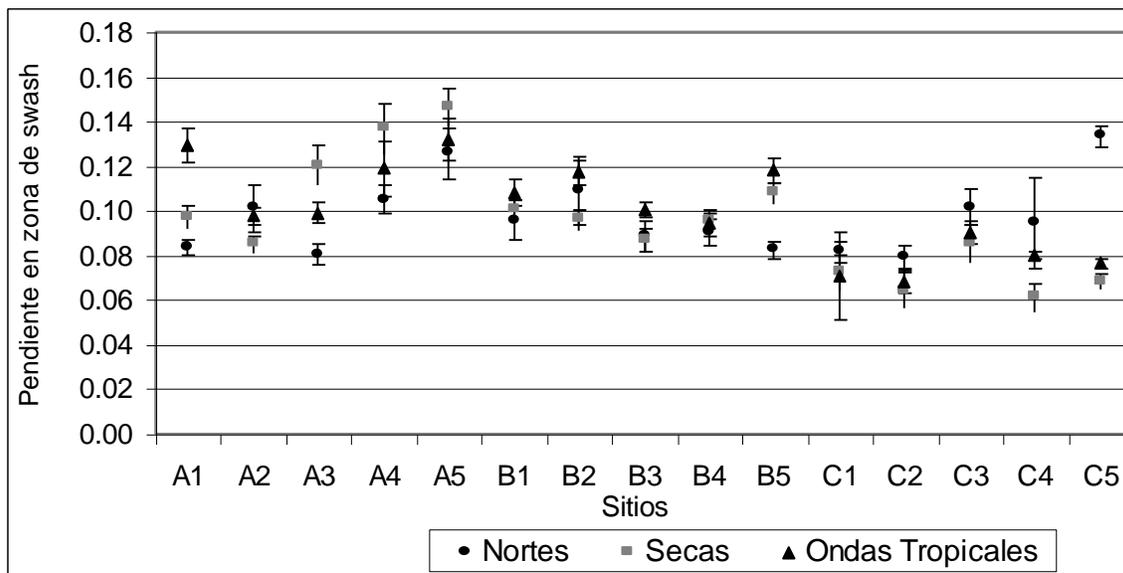


Figura 21. Pendiente promedio y su respectivo error estándar en la zona de swash para cada época climática.

A partir de los datos de perfiles interpolados cada 10cm y empleando como referencia vertical la altura ortométrica, se estimó la pendiente en la zona de intermareal o swash en dos metros de ancho, un metro a hacia mar y otro hacia tierra a partir del cero en vertical el cual está asociado con el nivel medio del mar. Esta zona suele ser la más dinámica de la playa. Normalmente, por efectos de erosión retrocede y durante este proceso su pendiente se reduce, mientras que durante el proceso de acresión, al ir depositando sedimento su pendiente se pronuncia, aumentando su valor. En la Figura 20 se muestra como la pendiente varía a lo largo del tiempo. Se eligieron dos de los perfiles con mayor número de registros.

Los casos mostrados corresponden a una zona urbanizada (A5) y una sin urbanización (A1). En ambos casos se observa el comportamiento que asocia valores de pendiente bajos durante la temporada de nortes y durante la temporada de secas y lluvias, los valores aumentan.

Como lo muestran las desviaciones estándares de los perfiles promedio de playa, esta zona es la más dinámica. En la figura 22 se observa que en ondas tropicales se presentan los valores promedios mas altos de la pendiente, mientras que en temporadas de nortes los valores son menores. Si bien esto es cierto de forma general, se puede apreciar que el comportamiento de la pendiente en las zonas A y B tienden a ser menores durante la época de nortes en contraste a la época de ondas tropicales, mientras que en la zona C este comportamiento se invierte.

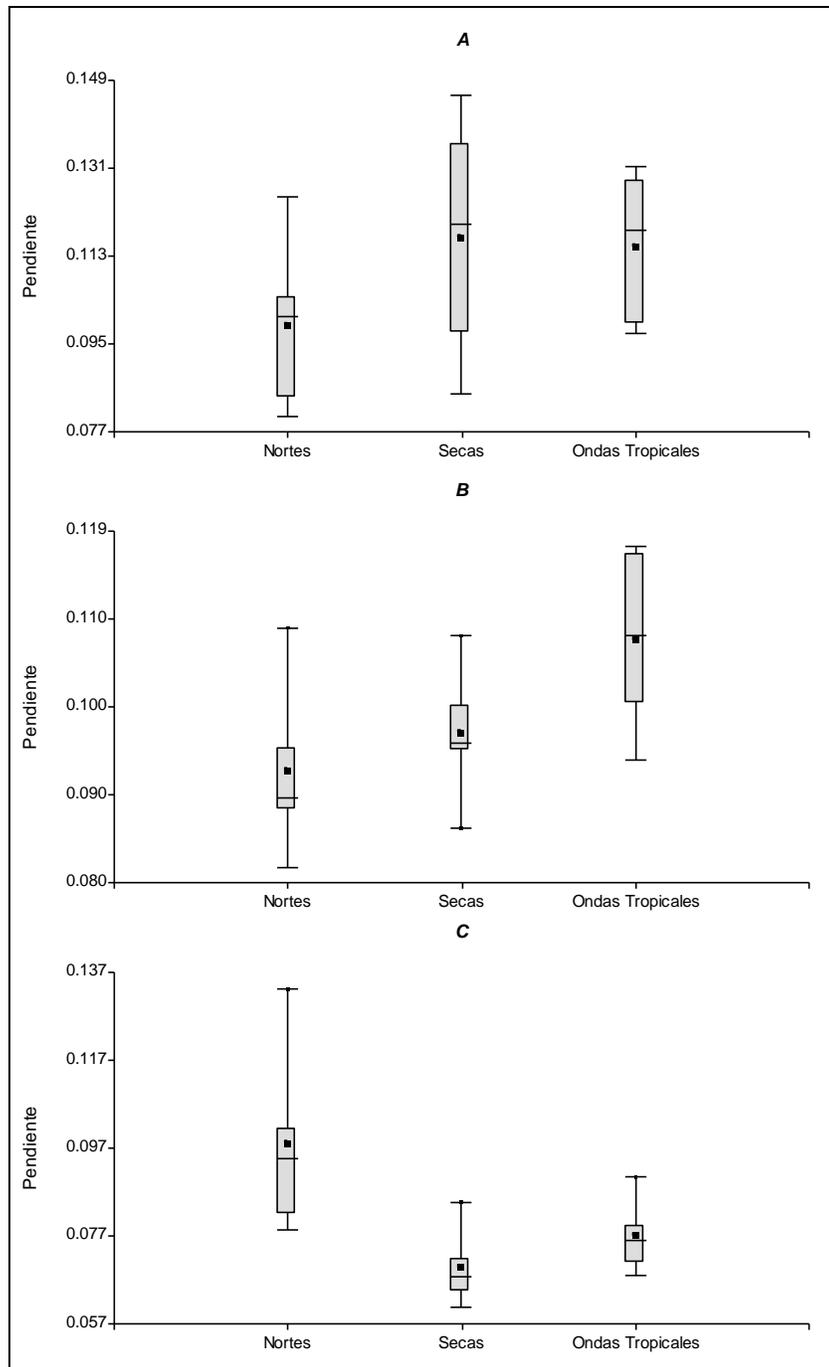


Figura 22. Pendiente en la zona de swash en cada uno de las zonas de estudio y por época climática. Nortes corresponde a los meses de octubre a febrero, secas de marzo a mayo y ondas tropicales de junio a noviembre.

Evolución de la posición de la línea de costa

El análisis de la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo, muestra que en la zona A (Figura 23), los perfiles A3 y A4 tienden a retroceder significativamente, en particular, en el sitio A4 con una tasa de 7.76m al año. Mientras que en los perfiles A1 y A2 se observa una tendencia a incrementar el ancho de playa. En la zona B puerto de Progreso, se observa que la posición de la línea de costa en los perfiles B1 y B2 tiende a retroceder y B3 se mantiene estable. Mientras que, B4 y B5 presentan una tendencia a progradar. A excepción del B3, el resto de los sitios de esta zona se muestran un tendencia significativa. Para el caso de la zona C al Este del área de estudio, la posición en C2 y C4 presenta una tendencia a retroceder, en particular en C4 donde su tendencia es mayor respecto a los otros sitios de la misma zona de 2m/año. Los sitios C1, C3 y C5 muestran una tendencia a programar.

La tendencia de la posición de la línea de costa, expresada como la tasa de avance o retroceso, puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de playas. Si se considera esta tendencia en combinación con el ancho de playa, entonces se puede generar un criterio que permita tipificar las playas en diferentes niveles de seguridad.

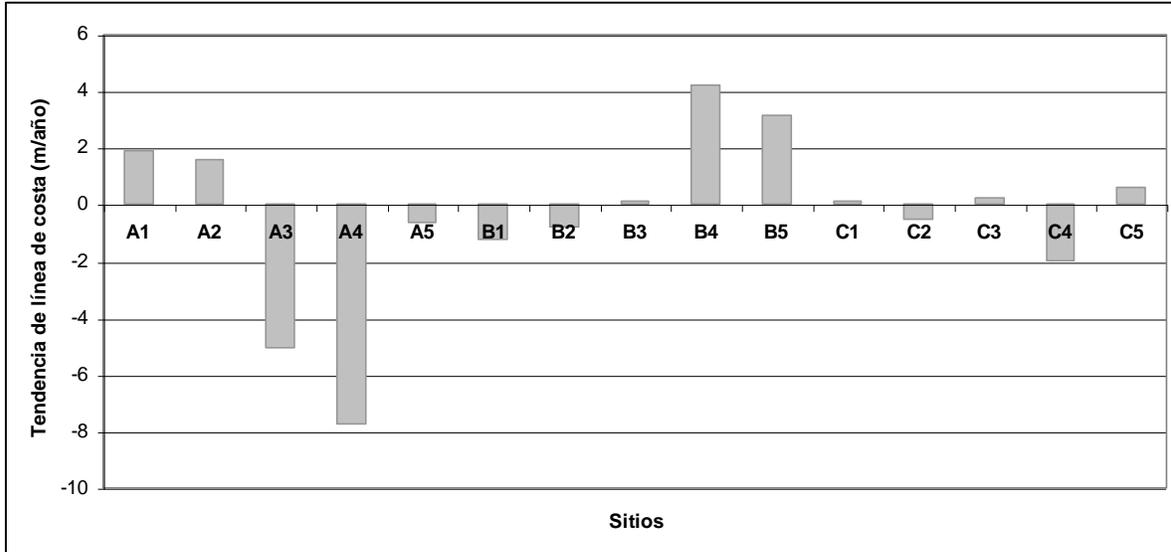


Figura 23. Tendencia del avance y retroceso de la línea de costa en el área de estudio. Los sitios A2, A3, A4, B1, B2, B4, B5, C2 y C4 fueron significativos.

El cambio de la distancia de la línea de costa a partir de su respectivo punto de referencia a lo largo del tiempo, muestra que para la zona A tiende a reducirse en los perfiles A2, A3 y A4, es decir, una tendencia a perder extensión de playa. Mientras que en dos casos, A1 y A5 se observa una tendencia a incrementarse el ancho de playa (Figura 24).

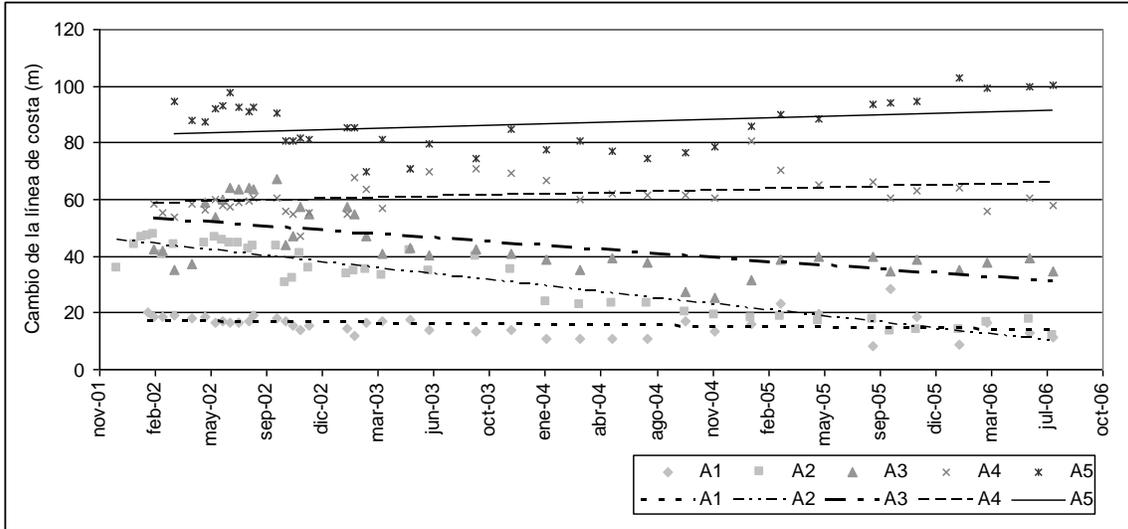


Figura 24. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona A, Chuburná y Chelem. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo.

En la zona B centro, puerto de Progreso, se observa que la distancia de la línea de costa en los perfiles B1, B2 y B3 tiende a reducir o a no mostrar cambios. Mientras que los más distantes al muelle de Progreso, B4 y B5 presentan una tendencia a incrementar Figura 25.

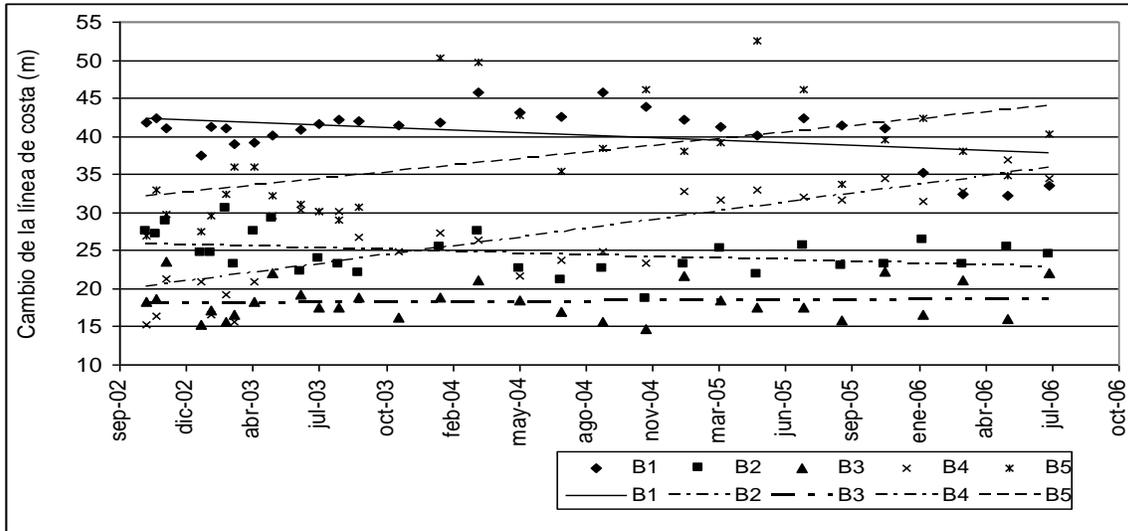


Figura 25. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona B, Puerto de Progreso. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo.

Para el caso de la zona C (Figura 26) al Este del área de estudio, en Uaymitún, se observa que la distancia de C2 y C4 presenta una tendencia a reducir su distancia a la línea de costa, en particular que la tendencia de C4 la cual es drástica respecto a los otros sitios de la misma zona. Los sitios C1, C2 y C3 muestran una tendencia a incrementar.

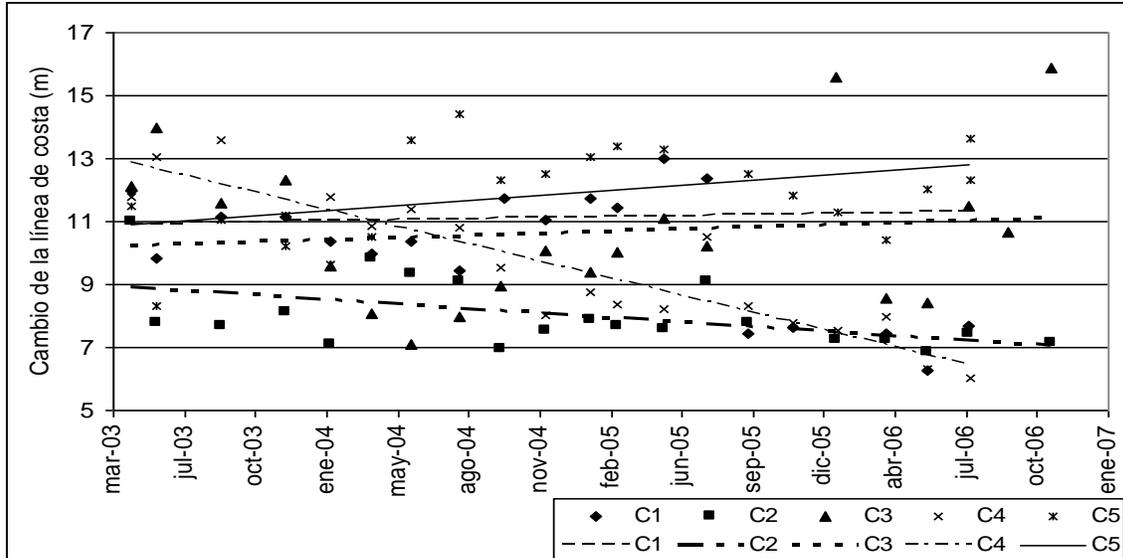


Figura 26. Cambio de la distancia de la línea de costa respecto al sitio de referencia para los perfiles correspondientes a la zona C, Uaymitún. En la gráfica se incorpora la línea de tendencia de cada sitio de muestreo.

En la figura 27 se muestra la desviación estándar máxima de cada perfil, como indicador de y el ancho de playa registrado en la última fecha de levantamiento topobatimétrico. Se considera que aquellos perfiles que presentan variaciones altas y anchos de playa angostos pueden representar mayor susceptibilidad a la erosión. Se observa que los perfiles A4, C1 y C4 son sitios que presentan estas características por lo que sugieren una alta susceptibilidad a la erosión. Los tres sitios presentan algún nivel de antropización, en especial A4.

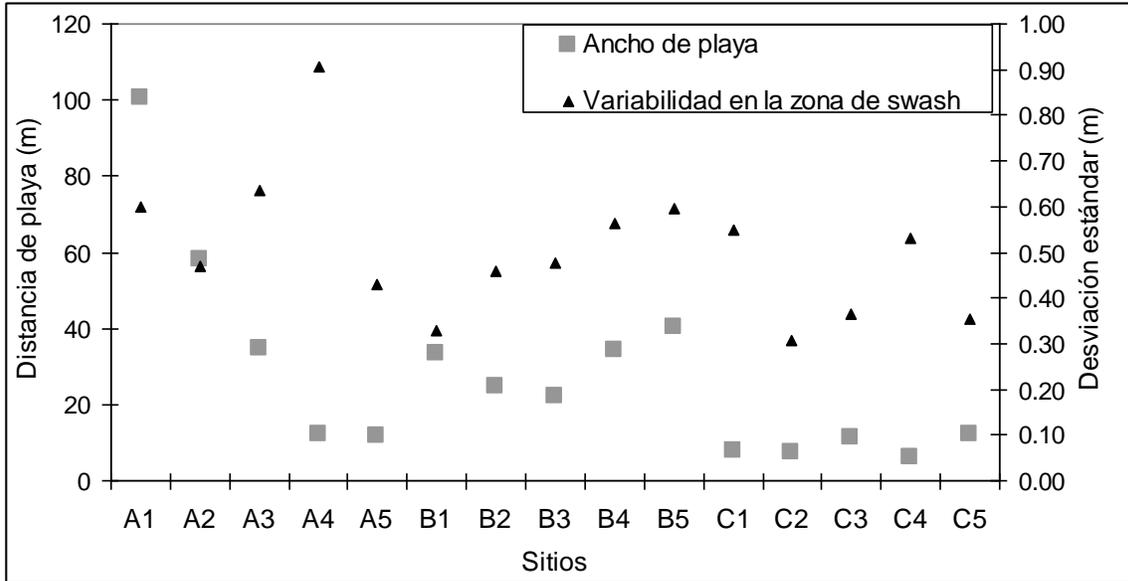


Figura 27. Ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006) y desviación estándar en la zona de swash de los perfiles promedio.

Los casos opuestos son los sitios A1, A2 y B1, consideradas como playas con baja susceptibilidad, donde sus variaciones son pequeñas y sus anchos de playa son suficientemente amplios para soportar mayores magnitudes de variación. En esta lista de playas menos susceptibles resalta el sitio A1, porque si bien presenta alta variabilidad, su ancho de playa es más amplio del área de estudio y la proporción de su variación no pone en riesgo el sistema de playa.

Se estimó para cada muestreo la distancia de la línea de costa a partir de su propio sitio de referencia. En general se observa una tendencia a reducir, es decir, una tendencia a perder extensión de playa. Sólo en algunos casos como el de A1 se observa una tendencia a incrementar.

Para el caso de A1 se observa que es en temporada de lluvias cuando muestra incrementos en la distancia de la línea de costa. En las temporadas de “nortes” tiende a mantenerse. Sólo al inicio de los registros se observa la reducción de la distancia, sin embargo esto sucede en respuesta de que corresponde al período de extracción de material sedimentario para utilizarlo como relleno de playas corriente arriba.

En la figura 28 se observa que las playas con extensión mayor a 60m (distancia de seguridad del decreto 801 del Estado de Yucatán) y con una tendencia a progradar se consideran de alta seguridad, tal como el sitio A1. El caso opuesto son aquellas playas de baja seguridad cuya extensión es menor a 20m (dentro de la zona federal) y con una tendencia a retroceder, como sucede en los sitios A4 y C4. Asimismo es posible proponer playas de seguridad intermedia, donde su extensión es mayor a los 20m pero menor a los 60m. En estos casos podemos encontrar playas con una tendencia a progradar, o bien, a retroceder, en cuyo caso serían candidatas para realizar intervenciones de manejo.

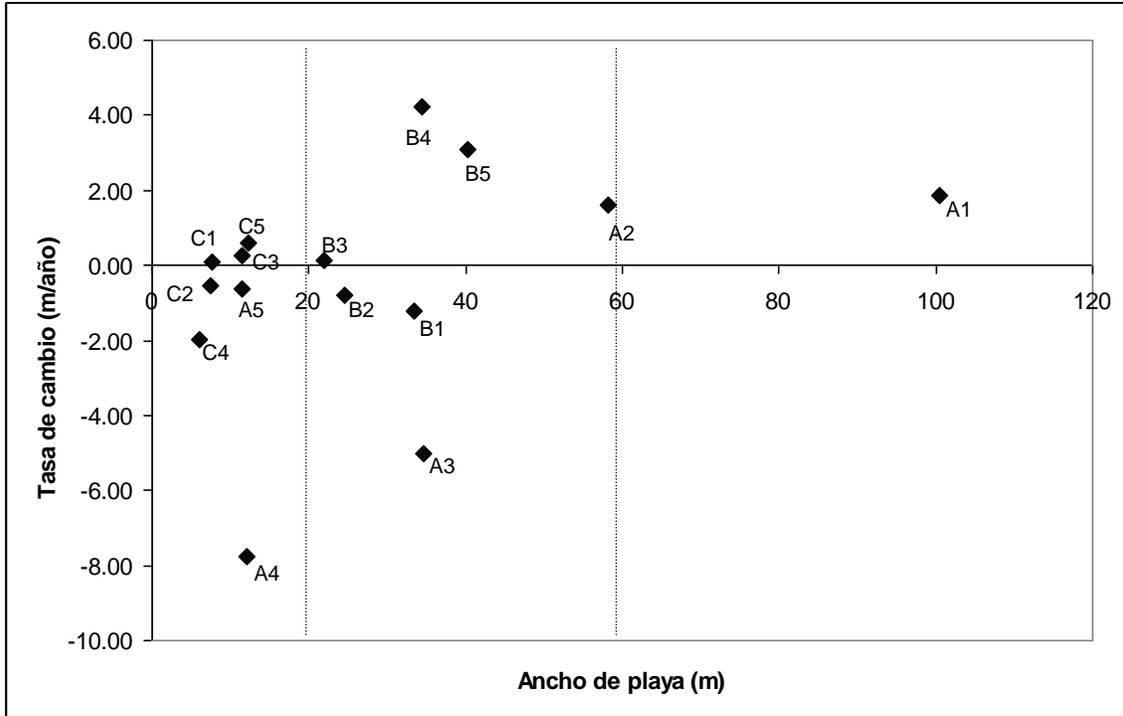


Figura 28. Ancho de playa de la última fecha registrada (julio de 2006) y tasa de cambio de la posición de la línea de costa.

4.2 Granulometría

A partir de las fracciones del material tamizado, se obtuvieron los percentiles que permitieron estimar la media, mediana, desviación estándar (dispersión o sorteo), asimetría y kurtosis, descriptores estadísticos del material sedimentario (Tabla 7). En general, la arena en la zona de swash se clasifica como arena gruesa, Mal clasificada, casi asimétrica y Mesocúrtica (Tabla 8).

Tabla 7. Descriptores estadísticos del análisis granulométrico de las muestras de sedimento correspondiente a la zona de swash. Los valores presentados en la tabla están en unidades phi.

Sitio	Media (Mz)	Sorteo (Ds)	Asimetría (Sg)	Kurtosis (Kg)
A1	0.8388	1.1675	-0.0500	1.0150
A2	0.8850	1.2213	-0.0275	1.0463
A3	1.4771	0.9400	-0.0614	1.1486
A4	1.1300	1.0925	-0.0325	0.9938
A5	1.1629	1.0443	-0.0471	1.0643
B1	0.8250	1.1530	-0.0320	1.0650
B2	0.9056	1.1867	-0.0444	0.9833
B3	1.1350	1.0988	-0.0625	1.2038
B4	0.9900	1.1463	-0.0375	0.9725
B5	1.1638	1.1463	-0.0488	1.0975
C1	0.5363	1.4738	-0.0213	0.9125
C2	0.3014	1.2986	0.0314	1.0214
C3	0.8725	1.2863	-0.0425	0.9400
C4	0.7522	1.3089	-0.0211	0.9500
C5	0.5278	1.4644	-0.0233	1.1567

Tabla 8. Clasificación del material sedimentario en la zona de swash, según Folk y Ward (Folk, 1966).

Sitio	Media (Mz)	Sorteo (Ds)	Asimetría (Sg)	Kurtosis (Kg)
A1	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
A2	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
A3	Arena media	Moderadamente clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
A4	Arena media	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
A5	Arena media	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
B1	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
B2	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
B3	Arena media	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
B4	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
B5	Arena media	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
C1	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
C2	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
C3	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
C4	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica
C5	Arena gruesa	Mal clasificado	Casi asimétrica	Mesocúrtica

En la tabla 9 se muestran los valores promedio de la mediana del diámetro de partícula del material sedimentario en mm para la zona de swash. Se muestra (en donde) la variación de entre arena gruesa a media, relativamente homogéneo a lo

largo del litoral muestreado y sin ningún gradiente aparente. Consistentemente el tamaño de arena en la zona de swash es mayor que el de la zona de surf (figura 29), como producto de la selección de tamaño que ejerce el oleaje en dicha zona. Se observó también que el material que permanece en la zona de swash está constituido por fragmentos de conchas de moluscos por lo que dominan las formas de plato.

Tabla 9. Valores de la mediana (Percentil 50, D50) en mm del diámetro de partícula en la zona de swash determinados de datos colectados entre 2004 y 2005.

Sitio	D50 (mm)	Sitio	D50 (mm)	Sitio	D50 (mm)
A1	0.5330	B1	0.5460	C1	0.7360
A2	0.5017	B2	0.5122	C2	1.2270
A3	0.3341	B3	0.4889	C3	0.5498
A4	0.4714	B4	0.5405	C4	0.5779
A5	0.5159	B5	0.4042	C5	0.6638

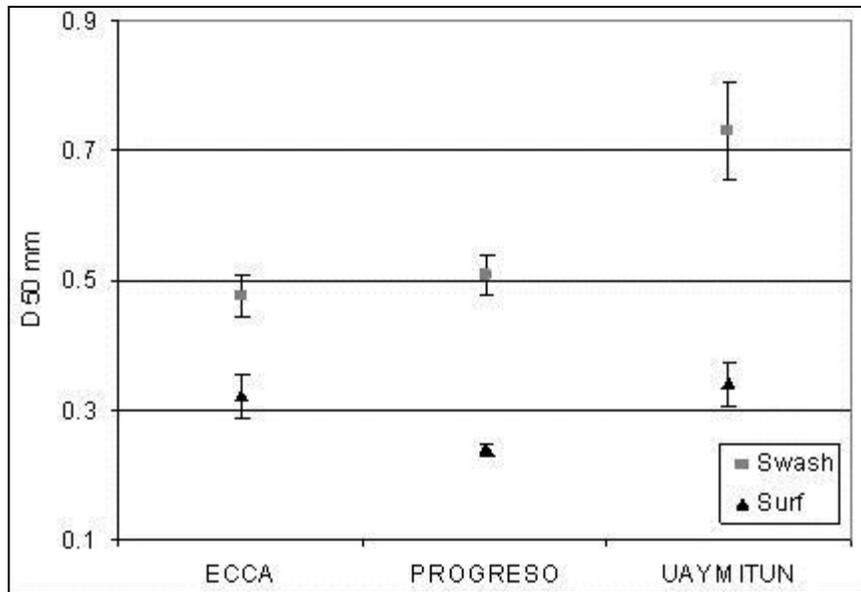


Figura 29. Comparación de los diámetros de partículas en la zona de swash y la zona de surf. Se incluye el error estándar del valor promedio.

4.3 Agentes de movimiento

4.3.1 Oleaje

Altura del Oleaje Durante el período de operación del sensor de oleaje se obtuvieron 15824 datos, determinando la altura media de ola significativa (H_s) de 24.19cm, desviación estándar de ± 16.15 cm, moda de 11.40cm, con un rango de 0.5 a 143cm. La media del período de ola significativa (T_s) fue de 3.55s, desviación estándar de ± 2.04 s, moda de 2.40s, con un rango de 0.60 a 15.0s. La longitud de ola significativa fue de 16.65m en el sitio del instrumento y en aguas profundas (L_0) se estimó en 17.62m. La celeridad de la ola se estimó en 4.96m/s en el sitio de

muestreo y de 5.25m/s en aguas profundas. Se observó que las olas más altas y de mayor período se presentan en la temporada de nortes (Figura 30).

. El oleaje a través de su altura (Hs) presenta para el conjunto total de valores medios mensuales un patrón de altura que decrece de enero a agosto y se incrementa de agosto a diciembre. Patrón que coincide con el de las velocidades de la corriente en la dirección dominante Oeste. A lo largo del día la altura del oleaje, de forma similar a la velocidad de la corriente, tiene un patrón sinusoidal con los valores menores de altura (21cm) entre las 7 y 9 de la mañana y alcanzar los valores mayores (33cm) entre las 17 y 19 horas). Altura de olas mayores a 60cm se presentan el 4% del año en los meses de enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre, diciembre hasta con 80 horas. Los valores extremos de altura mayores de 89cm se presentan en el mes de Enero. Alturas entre 0 y 32cm se presentan el 76% del año.

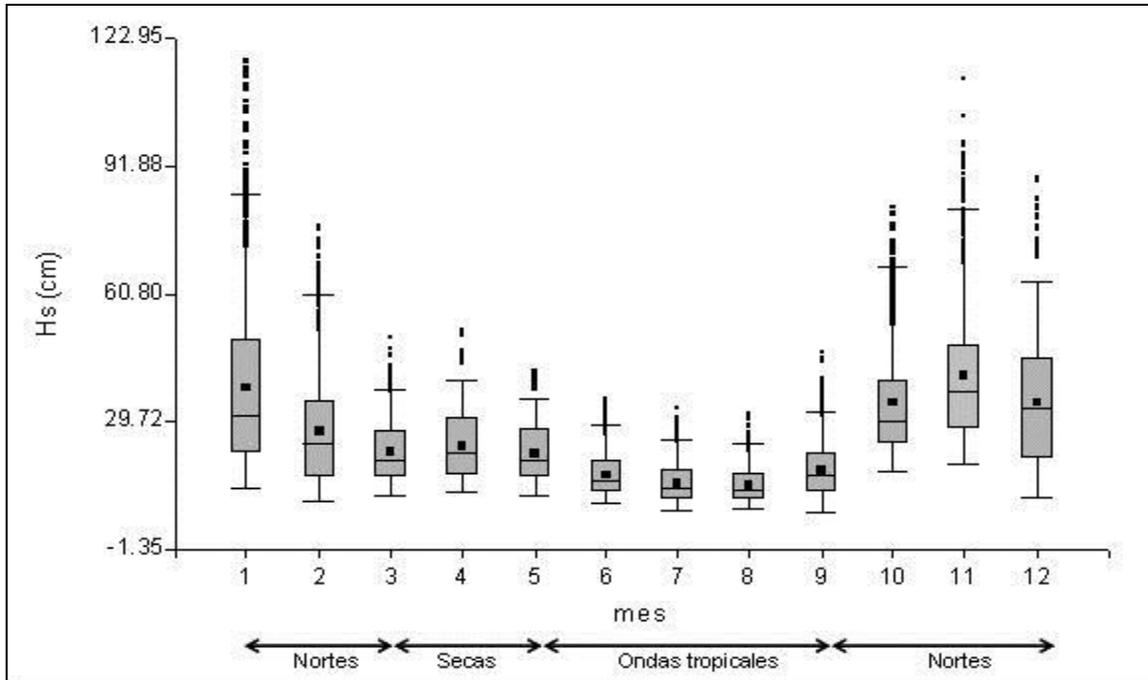


Figura 30. Promedio mensual de la altura significativa del oleaje.

Período del oleaje. El período en segundos del oleaje (T_p) tiene un valor promedio de 3.83s y una D.E. de 1.88s con valores mínimo y máximo de 1.15s y 12.08s. El comportamiento mensual muestra que los períodos mayores desde enero (5.38s) decrecen progresivamente hasta junio (2.7s) para luego incrementarse paulatinamente hasta diciembre (5.91s) (Figura 31). Con respecto a las variaciones por la hora del día se observa un patrón sinusoidal con un rango de variación que el análisis estadístico no reporta con diferencias significativas pero el patrón es muy claro. Hay diferencias significativas donde se observa la correlación positiva entre la altura de la ola y el período (0.64 pearson) que es de esperarse.

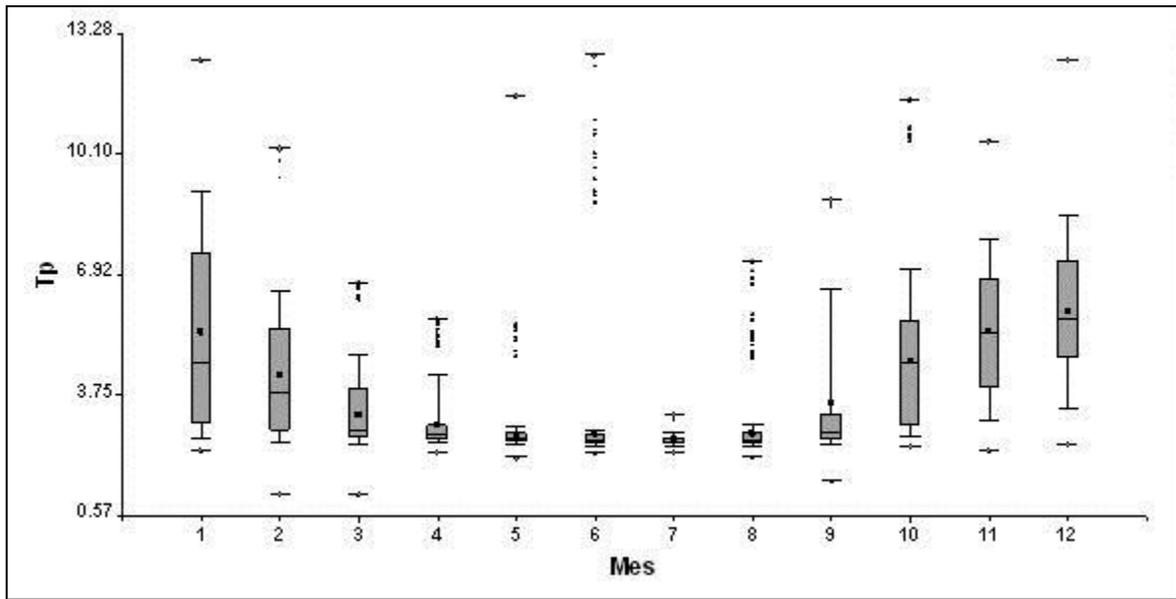


Figura 31. Comportamiento mensual del período de oleaje (s) a lo largo del año.

4.3.2 Corrientes

La velocidad promedio de la corriente en las direcciones dominantes O, ONO y OSO son de 11.3cm/s, 8.57cm/s y 9.08cm/s (Tabla 10). La velocidad máxima encontrada es de 27.50cm/s y se presenta en la dirección Oeste en el mes de enero. Las velocidades mayores a 20cm/s (72km/h), si bien esporádicas ocurren el 94% de las veces en la dirección oeste en los meses de enero, abril, mayo y junio, cabe señalar que al menos en una ocasión se presenta en la dirección Este durante el mes de enero. La velocidad promedio mensual en la dirección Oeste, si bien se

desarrolla en un rango relativamente pequeño, muestra un patrón de disminución de la velocidad de enero (12.96cm/s) a septiembre (9.56cm/s) para después iniciar nuevamente su incremento en los meses restantes. La velocidad también muestra un claro patrón sinusoidal de aumento y disminución de la corriente a lo largo del día, los valores promedio de cada hora muestran que las velocidades menores (8cm/s) se alcanzan entre las 4 y 6 de la mañana y las velocidades mayores (12cm/s) entre las 18 y 20 horas (es esto reflejo del también del viento).

Tabla 10. Frecuencias y porcentaje de la dirección de la corriente en 16 rangos. Velocidad promedio, error estándar (D.E.), mínimo y máximo de la corriente en las 16 direcciones (cm/s).

	Dirección	LI	LS	f	%	Velocidad	D.E.	Min	Max
1	N	348.75	11.25	29	0.33	2.23	1.19	0.50	4.80
2	NNE	11.25	33.75	41	0.47	2.45	1.23	0.38	5.87
3	NE	33.75	56.25	45	0.51	3.71	2.12	0.39	8.45
4	ENE	56.25	78.75	87	0.99	5.46	3.13	0.36	18.70
5	E	78.75	101.25	158	1.80	6.95	3.74	0.40	25.21
6	ESE	101.25	123.75	79	0.90	4.87	2.67	0.34	10.80
7	SE	123.75	146.25	47	0.54	3.58	1.88	0.28	9.45
8	SSE	146.25	168.75	34	0.39	2.38	1.22	0.18	4.72
9	S	168.75	191.25	42	0.48	2.82	1.63	0.40	6.02
10	SSO	191.25	213.75	50	0.57	3.07	1.73	0.34	7.61
11	SO	213.75	236.25	134	1.53	4.66	2.23	0.74	11.53
12	OSO	236.25	258.75	1208	13.79	9.08	3.83	0.49	23.21
13	O	258.75	281.25	5229	59.70	11.30	3.84	0.20	27.50
14	ONO	281.25	303.75	1390	15.87	8.57	3.08	0.73	19.16

15	NO	303.75	326.25	137	1.56	4.59	2.19	0.43	10.26
16	NNO	326.25	348.75	49	0.56	2.61	1.34	0.11	5.37
Totales				8759	100.00				

Dirección de la corriente. La dirección de la corriente es principalmente dominante en tres direcciones Oeste ($258.75^\circ - 281.25^\circ$), Oeste Noroeste ($281.25^\circ - 303.75^\circ$) y Oeste-Suroeste ($236.75^\circ - 258.75^\circ$) en un 60%, 13% y 12% respectivamente a lo largo del año, el 12% restante en las otras direcciones (Figura 32). En la dirección Oeste, el mes de marzo es el que presenta una mayor persistencia con (513h), mientras que septiembre es el mes con el menor número (329h), los otros meses dentro de este rango. La Tabla 10 muestran la distribución de frecuencias de la dirección de la corriente en 16 clases, también en ella se observa que a lo largo del año, aunque muy poco frecuente (43h) se dirige hacia el Sur, este movimiento de la corriente normal a la playa ocurre principalmente durante los meses de junio, septiembre y diciembre con tiempos no mayores de 7 h/mes. También de forma esporádica (162h) la corriente se invierte y se dirige en la dirección Este y ocurre principalmente durante los meses de junio, octubre y diciembre en un rango de tiempo de 22 a 37 h/mes) (Figura 33).

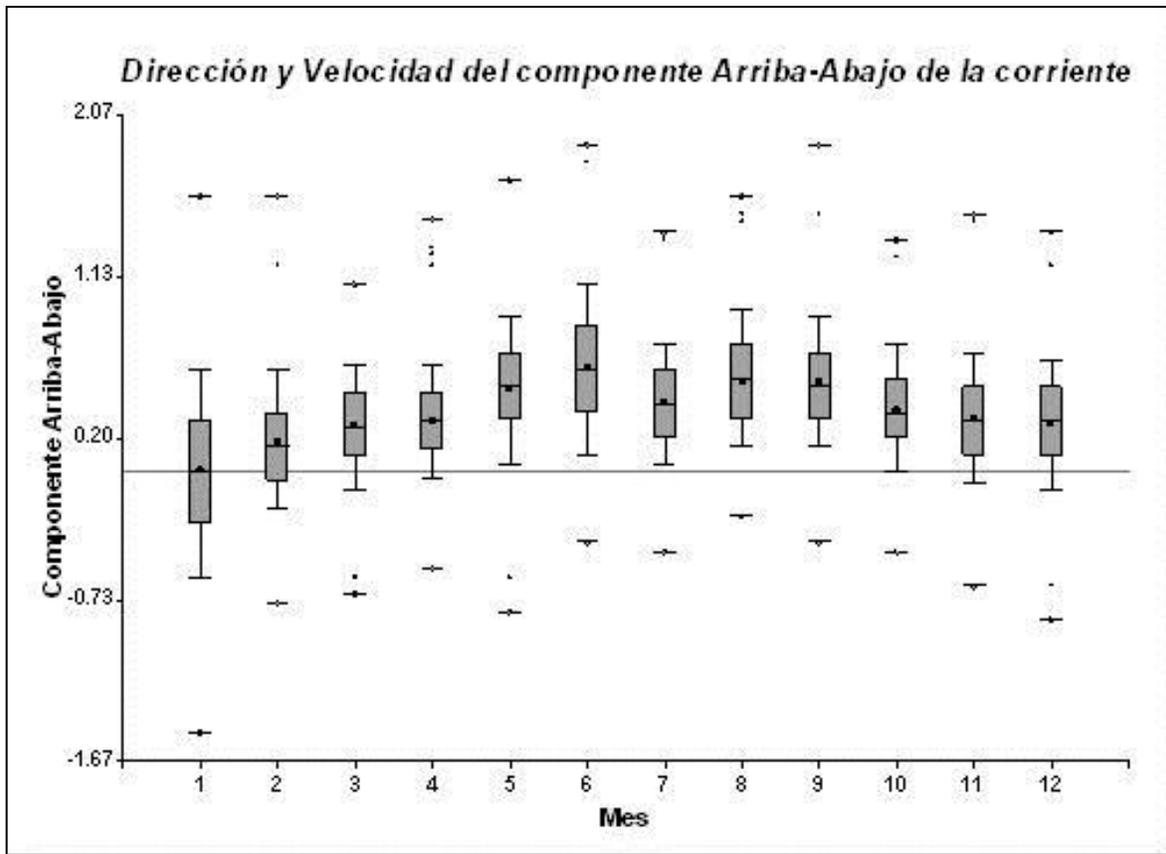


Figura 32. Dirección y velocidad del componente Arriba-Abajo del vector de velocidad (cm/s)

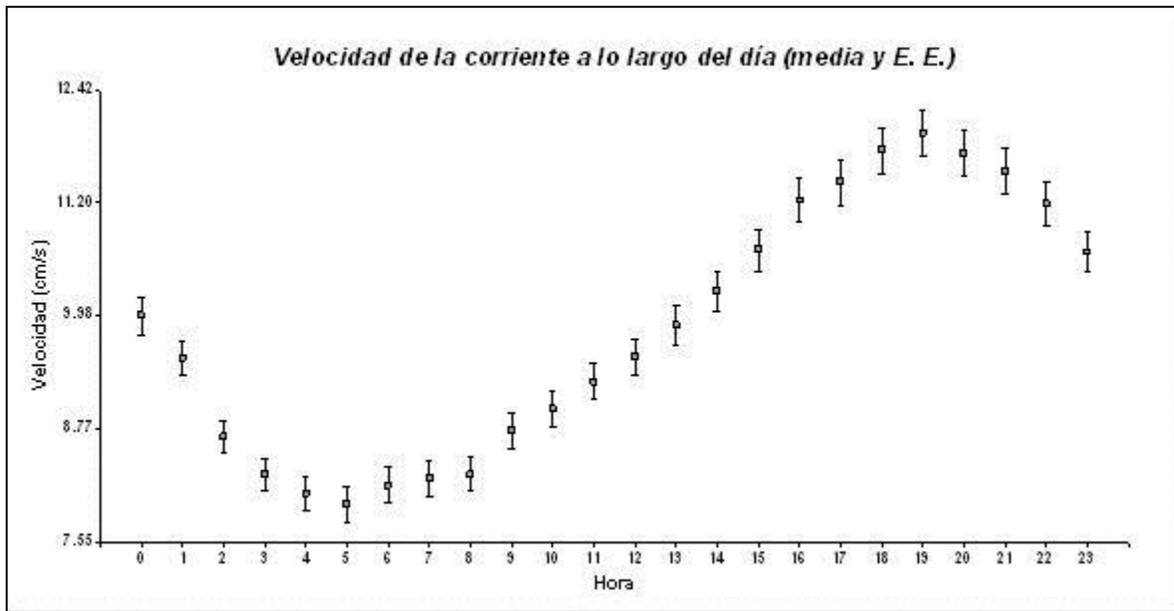


Figura 33. Velocidad de la corriente a lo largo del día (cm/s).

4.3.3 Viento

Descripción de vientos dominantes registrados en las Estaciones climatológicas convencionales por temporada climática. Los registros de viento de las estaciones climatológicas convencionales localizadas a lo largo la zona costera se encuentran limitados en su representatividad debido a que sólo muestran el viento de las 8:00 am. Sin embargo aportan información importante dado que es el único instrumento que registra viento con esa cobertura geográfica con una larga serie de tiempo. Con excepción de Celestún, el viento dominante en temporada de ondas tropicales es del sureste con velocidades de hasta 6m/s en el caso de Chicxulub

Puerto. En el caso de Celestún no muestra diferencias entre frentes fríos y ondas tropicales y en ambos casos el viento proviene del noreste.

Con Estaciones climatológicas automáticas, los registros tienen una menor cobertura geográfica y su operación inició en el año 2000, por lo que su registro es de tan solo 6 años. Sin embargo la frecuencia de registro es de cada 10 minutos y su precisión es mucho mayor que la de las estaciones convencionales. De manera que la descripción de vientos dominantes puede ser complementada junto con los datos de las estaciones convencionales.

Celestún. Se observa como el viento varía de mes a mes en dirección y velocidad por efecto de las condiciones atmosféricas dominantes. Se observa que los vientos del norte inician en el mes de octubre y cesan hasta abril o mayo, con intensidades máximas de hasta 11m/s en el mes de enero. Los vientos influenciados por ondas tropicales, provenientes del sureste inician de manera dominante a partir de marzo y a partir de junio la dominancia proviene del este hasta septiembre y de septiembre a enero el viento dominante proviene del noreste. Con intensidades máximas dominantes de hasta 8.8 m/s (Figura 34).

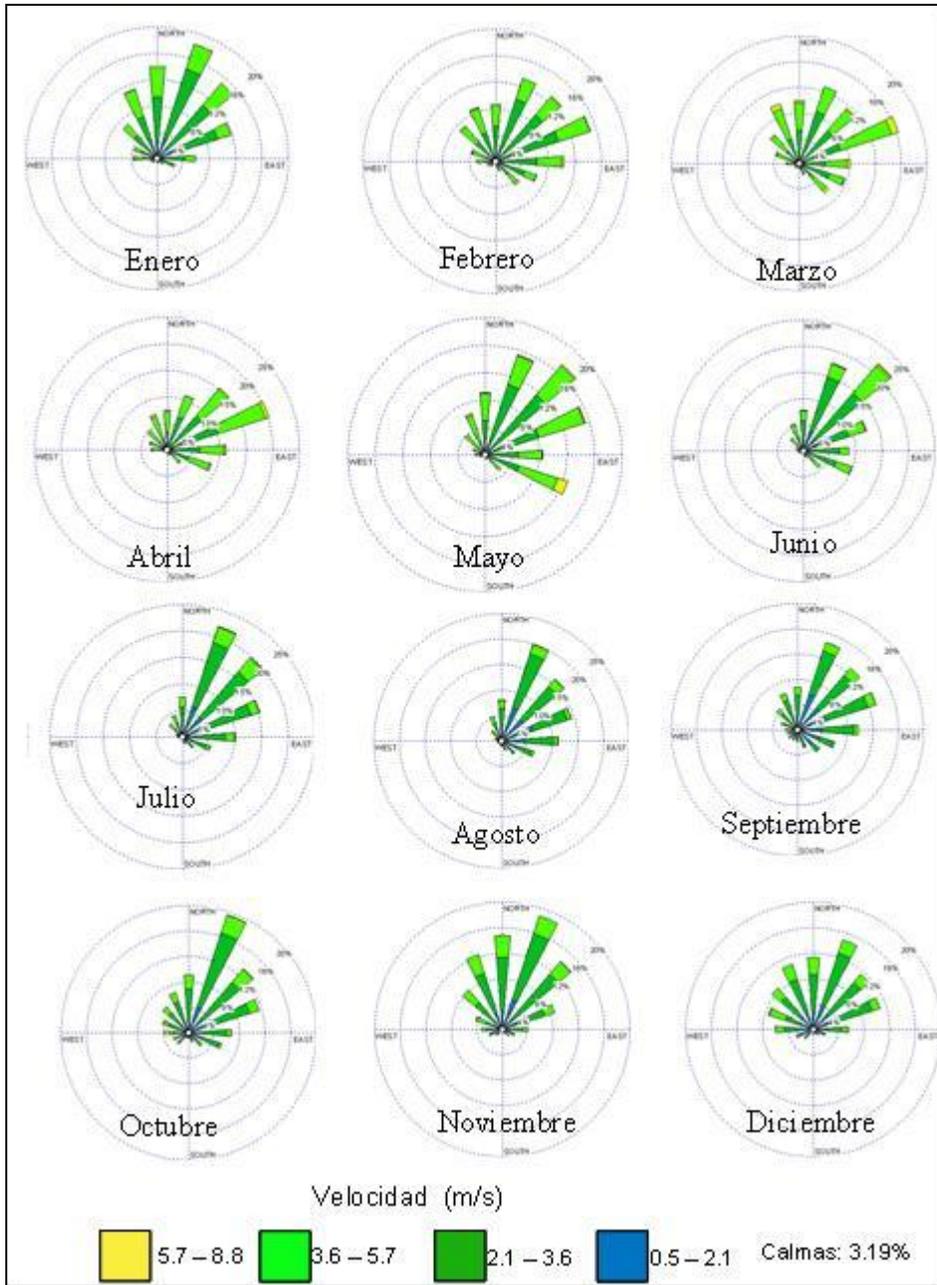


Figura 34. Patrones de viento dominante a lo largo del año por meses, de la estación climatológica automática de la ciudad de Mérida. Registros por anemómetros digitales de cada 10 minutos. La serie comprende datos desde el año 2000 al 2006.

Este comportamiento del viento explican por un lado la dirección de arribo del oleaje (NE) y del transporte sedimentario a lo largo de la costa en la dirección preferencial Este a Oeste, así como de las formaciones o acumulaciones que se producen con obstáculos colocados normales a la costa como las escolleras y los espigones que acumulan en su costado Oeste.

4.4 Parámetro adimensional Omega

A partir de los resultados obtenidos de sedimento y oleaje se estimaron los valores del parámetro adimensional Omega para cada sitio de playa muestreado, en la zona de swash y en la zona de surf. En general las playas estudiadas se clasifican como playas intermedias, sin embargo, los promedios muestran que la zona de swash presenta valores de Omega menores a los de la zona de surf cercano a los límites de playas reflectivas. Esto como resultado del efecto del tamaño de partícula quien determina la velocidad de asentamiento. Si bien, en lo general, para toda la costa se emplearon las mismas condiciones de clima de oleaje, el parámetro Omega muestra una variación a lo largo de la costa (Figura 35).

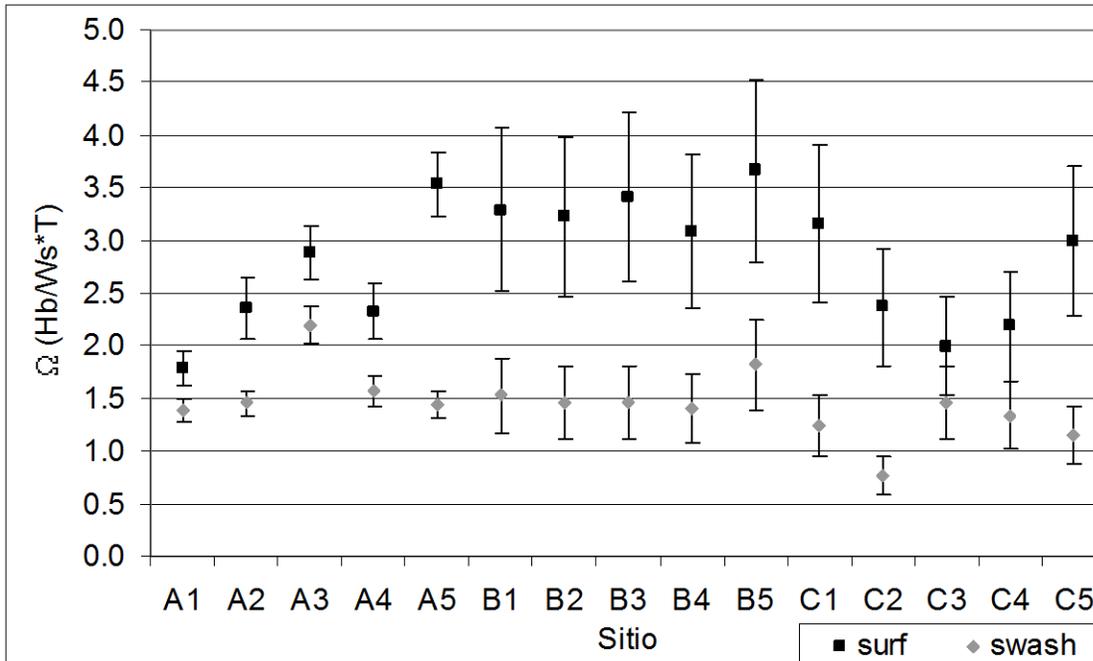


Figura 35. Variabilidad espacial del parámetro adimensional Omega, a lo largo de la costa y entre la zona de swash y zona de surf. Se muestran los valores promedio y error estándar.

Dado que los valores de omega son estimados a partir de factores con variabilidad temporal, como son el clima de oleaje y el tamaño de partícula, se considera importante mostrar también la variabilidad de dicho parámetro en el tiempo. En la figura 36, se ejemplifica con la gráfica de la variabilidad temporal del parámetro Omega correspondiente al sitio A5.

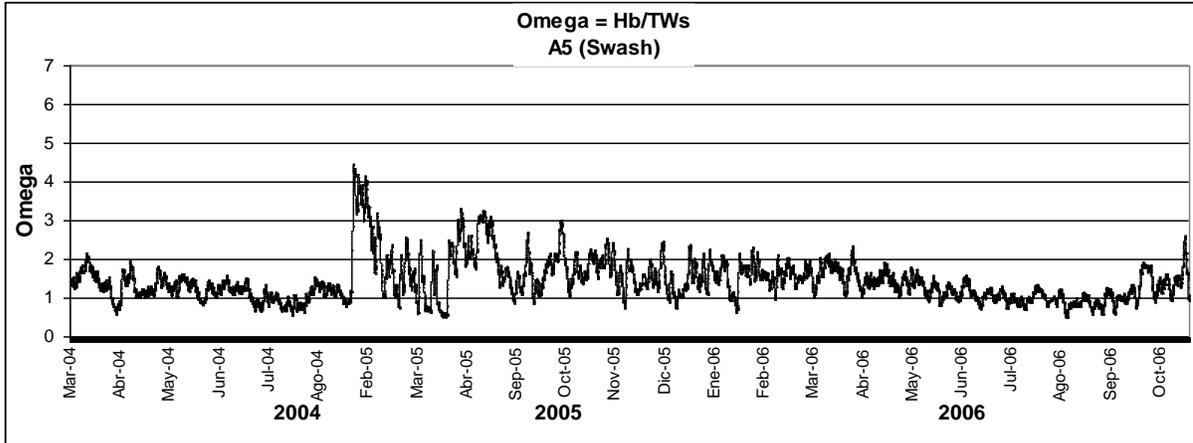


Figura 36. Variación temporal del parámetro adimensional Omega en la zona de swash del perfil A5.

El parámetro adimensional Omega es determinado a partir del clima de oleaje y de las características de la partícula sedimentaria, lo cual ha permitido tipificar playas como lo demuestran algunos trabajos (e.g. Benedet *et al.* 2004b). Sin embargo, este trabajo propone identificar otras características morfodinámicas de playa complementarias, que permitan obtener una descripción más precisa para fines de manejo. Se exploró la correlación entre Omega dos descriptores, la pendiente en la zona de swash y la tendencia de la posición de la línea de costa. Los valores de correlación obtenidos fueron de -0.0011 y -0.1861, respectivamente, con lo que se deduce que el proceso de acumulación o erosión, expresado en la pendiente y en la tendencia en la posición de la línea de costa no está completamente reflejado por el parámetro Omega.

Con la finalidad clasificar las playas estudiadas en función de las características morfodinámicas y sus propiedades disipativas o reflectivas, se empleó el parámetro Omega (Ω). Este parámetro, conocido como velocidad de asentamiento adimensional, relaciona el clima del oleaje, gravedad específica y tamaño de sedimento. La aplicación de Ω define un esquema de calcificación discreto por la morfología de las playas como producto de los procesos de cambio. Son tres las categorías posibles: Menor a 1, se define como playas reflectivas; entre 1 y 6 como intermedias y mayor que 6 como playas disipativas.

La ecuación se aplicó utilizando los datos de dos zonas de playa, la zona de intermareal o de swash y la zona sublitoral o de surf. El resultado muestra que en la zona de estudio la zona de sublitoral se muestra como intermedia a excepción del A1, cercano a la escollera de Chuburná, donde muestra ser reflectiva. A diferencia de la zona intermareal, el valor de Ω indica que es una zona reflectiva, con excepción del A3, en el poblado de Chuburná.

El valor de Ω en la zona de intermareal, en general va entre los valores de 1 y 2 sin variaciones importantes a lo largo de la costa. No sucede lo mismo para el caso del valor de Ω en la zona de sublitoral, donde muestra que las playas de Chuburná (A1, A2, y A3) presentan valores por debajo del 3, mientras que las playas de Chelem y Progreso muestran valores mayores a 3, se decir, tienden a ser más disipativas, posiblemente por efecto del Muelle de Progreso.

4.5 Indicador de susceptibilidad a la erosión

4.5.1 Integración de factores

Los resultados obtenidos en el análisis de fotointerpretación y del análisis obtenido de los perfiles de playa se eligieron: la presencia de vegetación de duna, el ancho de playa, la extensión de antropización y la tendencia erosivo/acumulativa de la línea de costa y se sometieron al análisis multicriterio (MCE). Cada uno fue estandarizado linealmente en un rango de valores de 1 a 100 con relaciones directas e inversas de la siguiente forma: la presencia de vegetación de duna reduce la susceptibilidad a la erosión (relación inversa); a mayor ancho de playa menos susceptible (inversa); a mayor extensión de antropización mayor la presión sobre la playa y por tanto, mayor susceptible a la erosión (directa); y la tendencia erosivo/acumulativa de la línea de costa, los valores negativos, es decir, tendencia erosiva representan mayor susceptibilidad a la erosión (inversa). A cada factor estandarizado se combinó aplicando el mismo peso a cada uno de ellos (Figura 37). Se puede observar que en general, el indicador construido con las distintas fuentes de datos (fotointerpretación y perfiles de playa) muestra el sitio A4 y B3 como los más susceptibles a la erosión mientras que los casos opuestos, los de menor susceptibilidad a la erosión son A1, C3, C4 y C5. Se encuentran tendencias similares en ambas fuentes de análisis de datos. En general se observa una gran confianza en los resultados obtenidos por su congruencia con lo que sucede en cada sitio.

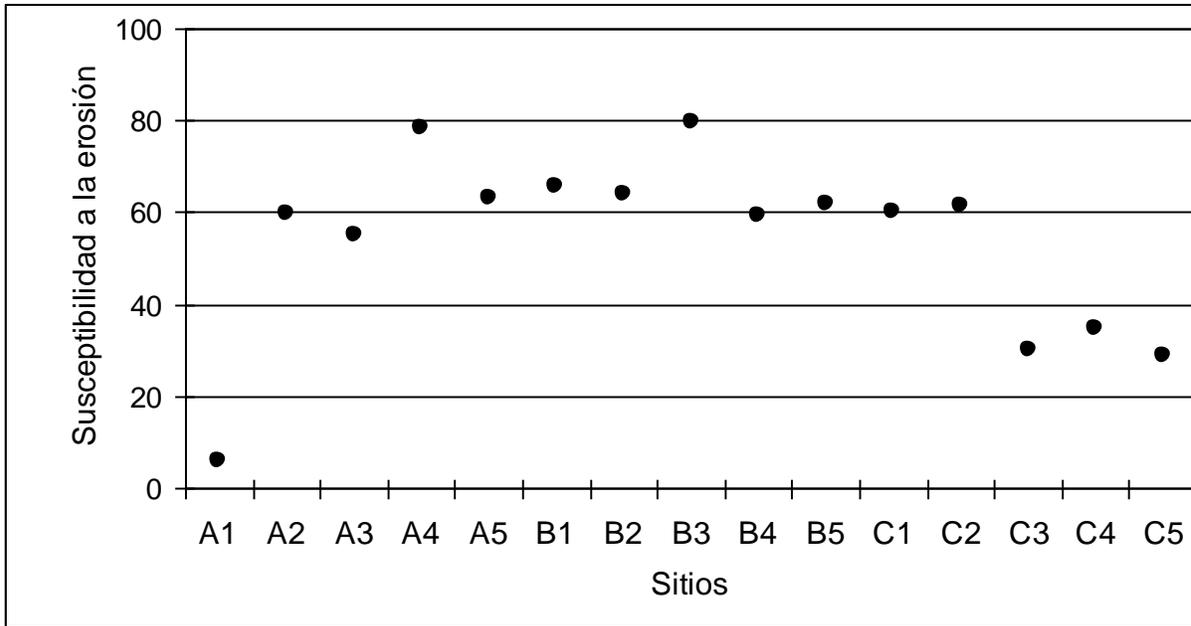


Figura 37. Nivel de susceptibilidad a la erosión integrando los factores obtenidos en el análisis de la fotointerpretación y los obtenidos en el análisis de perfiles de playa.

El parámetro adimensional Omega es determinado a partir del clima de oleaje y de las características de la partícula sedimentaria, lo cual ha permitido tipificar playas como lo demuestran algunos trabajos (e.g. Benedet *et al.* 2004b). Sin embargo, este trabajo propone identificar otras características morfodinámicas de playa complementarias, que permitan obtener una descripción más precisa para fines de manejo. En la tabla 11 se concentran los valores los descriptores de playa y el parámetro Omega.

Tabla 11. Resumen de los descriptores morfodinámicos que tipifican las playa, siendo la pendiente de la zona de swash, la variabilidad de la misma zona, la tendencia de la línea de costa, tamaño de sedimento y los valores del parámetro omega.

Sitio	Pendiente Nortes	Pendiente Secas	Pendiente Lluvias	Desv. est. máxima (swash)	Tendencia línea de costa Erosiva / Acumulativa	D50 (mm)	Omega en swash	Omega en surf
A1	0.0834	0.0969	0.1288	0.5992	0.0052	0.5330	1.3852	1.7859
A2	0.1006	0.0847	0.0973	0.4695	0.0044	0.5017	1.4579	2.3554
A3	0.0802	0.1199	0.0988	0.6350	-0.0138	0.3341	2.1951	2.8772
A4	0.1048	0.1363	0.1186	0.9052	-0.0212	0.4714	1.5648	2.3220
A5	0.1255	0.1462	0.1317	0.4284	-0.0017	0.5159	1.4386	3.5337
B1	0.0953	0.1000	0.1079	0.3298	-0.0034	0.5460	1.5244	3.2893
B2	0.1087	0.0959	0.1169	0.4582	-0.0022	0.5122	1.4552	3.2266
B3	0.0884	0.0865	0.1001	0.4777	0.0004	0.4889	1.4628	3.4060
B4	0.0898	0.0948	0.0940	0.5614	0.0116	0.5405	1.3987	3.0877
B5	0.0821	0.1077	0.1176	0.5950	0.0087	0.4042	1.8228	3.6631
C1	0.0813	0.0719	0.0704	0.5472	0.0003	0.7360	1.2451	3.1616
C2	0.0785	0.0640	0.0682	0.3051	-0.0014	1.2270	0.7688	2.3651
C3	0.1015	0.0847	0.0902	0.3663	0.0007	0.5498	1.4681	1.9978
C4	0.0943	0.0608	0.0796	0.5314	-0.0055	0.5779	1.3383	2.1828
C5	0.1329	0.0678	0.0760	0.3545	0.0016	0.6638	1.1469	2.9905

Se exploró la correlación entre Omega dos descriptores, la pendiente en la zona de swash y la tendencia de la posición de la línea de costa. Los valores de correlación obtenidos fueron de -0.0011 y -0.1861, respectivamente, con lo que se deduce que el proceso de acumulación o erosión, expresado en la pendiente y en la

tendencia en la posición de la línea de costa no está completamente reflejado por el parámetro Omega.

4.5.2 Identificación de sitios prioritarios

Entre los descriptores morfodinámicos empleados, la tendencia de la posición de la línea de costa, expresada como la tasa de avance o retroceso, puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de playas. Si se considera esta tendencia en combinación con el ancho de playa, entonces se puede generar un criterio que permita tipificar las playas en diferentes niveles de seguridad. En la figura 34 se observa que las playas con extensión mayor a 60m (distancia de seguridad del decreto 801 del Estado de Yucatán) y con una tendencia a progradar se consideran de alta seguridad, tal como el sitio A1. El caso opuesto son aquellas playas de baja seguridad cuya extensión es menor a 20m (dentro de la zona federal) y con una tendencia a retroceder, como sucede en los sitios A4 y C4, siendo entonces éstas, playas con prioridad a atención. En el caso de B3 también debe ser incluida en este grupo de atención como lo sugiere la Figura 37, del nivel de susceptibilidad, por la vulnerabilidad dado el sitio urbanizado donde se encuentra. Asimismo es posible proponer playas de seguridad intermedia, donde su extensión es mayor a los 20m pero menor a los 60m (Figura 38). En estos casos podemos encontrar playas con una tendencia a progradar, o bien, a retroceder, en cuyo caso serían candidatas para realizar intervenciones de manejo.

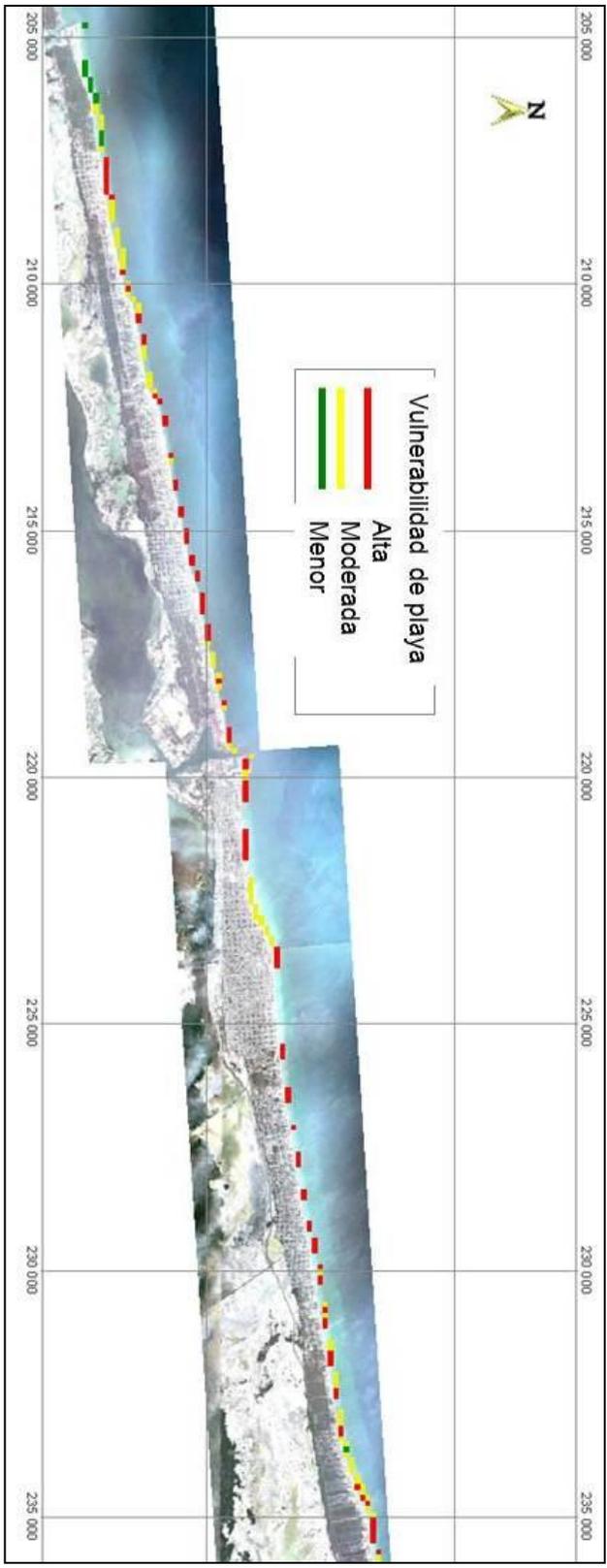


Figura 38. Mapa con la tipificación de vulnerabilidad a la erosión en el área de estudio. Los sitios marcados en rojo sugieren las áreas de mayor vulnerabilidad.

CAPÍTULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Este estudio integró conceptos de morfodinámica y genera indicadores de susceptibilidad a la erosión costera, de utilidad en el tema de selección de sitios prioritarios para acciones de manejo, a partir de la determinación de características granulométricas y formas topográficas en los procesos de alimentación de playa, así como para establecer políticas en regulación para el desarrollo de la costa que permita tanto conservar los sistemas de playa como proteger los bienes e infraestructura en el largo plazo.

Si bien el resultado que integra las características geomorfológicas y su distribución espacial a través del método de multicriterio refleja las condiciones de susceptibilidad a la erosión y la vulnerabilidad, se considera que puede ser mejorado si la variable de antropización fuera estimada en un gradiente de densidad de antropización en lugar de presencia / ausencia. Asimismo, el empleo de la capa de orientación de playa puede jugar un papel importante para la tipificación del litoral, sin embargo, aún falta por caracterizar mejor las condiciones del clima de oleaje y corrientes a escala local, a través de análisis de refracción y el ángulo de incidencia del oleaje en las diferentes épocas climáticas, esto contribuiría en la descripción de los patrones de erosión o acumulación en la zona de playa. Por tanto, para explorar mejor el papel que realiza este factor, es necesario incluir en el análisis una capa de la batimetría y un modelo de refracción.

El indicador de susceptibilidad a la erosión, se considera la necesidad de otorgar mayor peso a algunos factores / descriptores proveniente del análisis de perfiles dado que éstos son producto de mediciones directas en campo, lo que puede aportar mayor confianza en el descriptor mismo. Sin embargo, no se asignó un peso diferencial en los factores debido a que aún no se conoce el nivel de importancia que juega cada factor en el proceso de cambio en la morfología de playa. El empleo del ancho de playa, vegetación y antropización permitieron una primera aproximación a la estimación del nivel de vulnerabilidad debido a que se observó que en los segmentos de playa con alta susceptibilidad a la erosión, se presentan asociados a zonas con antropización de manera consistente sin vegetación de duna y cuyos anchos de playa son angostos.

El análisis de perfiles topobatimétricos en tiempo y espacio, arroja mucha información sobre la dinámica de playa. En el caso del empleo de la desviación estándar del perfil consistentemente se observó que la zona de mayor cambio a lo largo de cada perfil es en la zona de intermareal o zona de swash. Considerar la desviación estándar como indicador de cambio en el perfil de playa en conjunto con el ancho de playa muestra que las zonas de mayor cambio y menor ancho de playa corresponden a las zonas con algún grado de susceptibilidad a la erosión de playa. Los resultados sugieren que los perfiles A4, B3, C1 y C4, requieren un manejo oportuno y apropiado, en particular A4 donde el análisis de percepción remota la coloca como una zona muy vulnerable por el nivel de antropización.

Respecto a la pendiente en la zona de swash se reconoce que los valores más altos, al término de la temporada de nortes y en la temporada de tormentas tropicales. Los valores menores están relacionados con la temporal de secas, mayo y junio, y al término de la temporada de tormentas tropicales.

El tamaño de grano en la zona de swash se distinguió por sus diámetros de partícula de arena gruesa como resultado de la acción de clasificación por acción del oleaje en esta porción del perfil de playa. Pero muy fina en la zona de surf, lo que permite un importante transporte normal y paralelo a la línea de costa. Los análisis revelaron que la zona de swash está conformada de arena gruesa, con pendientes pronunciadas en la temporada de tormentas tropicales y suavizadas en la temporada de nortes. Esta zona presentó, consistentemente, la mayor variabilidad a la erosión y la acumulación en cada perfil, confirmando su alta dinámica. En planta, el análisis de la posición de la línea de costa en los 15 perfiles no sugiere que exista una clara tendencia generalizada de avance o retroceso en el área de estudio, es necesario agregar que esta zona se encuentran altamente influenciada por acciones de manejo con alimentación artificial, estructuras de protección y estabilización de la línea de costa, que se superpone a los procesos naturales del sistema.

El cambio en la posición de la línea de costa, a lo largo del tiempo, permitió conocer la tendencia que tiene cada sitio a incrementar la extensión de playa o erosionarse. Sin embargo, es importante reconocer que lo que refleja esta tendencia es también el efecto de las acciones de manejo. Las acciones de manejo pueden alterar la morfología de la playa como su extensión, pendiente y características

granulométricas del sedimento, y por tanto, los patrones hidrodinámicos locales. En la zona de estudio, se cuenta con lugares con acciones de relleno de playa, retiro de estructuras de protección o estabilidad como son los espigones o la colocación de estructuras blandas como geotubos.

Los análisis revelaron que la zona de swash está conformada de arena gruesa, con pendientes pronunciadas en la temporada de tormentas tropicales y suavizadas en la temporada de nortes. En esta porción de la playa se presentó, consistentemente, la mayor variabilidad a la erosión y la acumulación en cada perfil confirmando su alta dinámica. En planta, el análisis de la posición de la línea de costa no sugiere que exista una clara tendencia generalizada de avance (4 con pendiente positiva significativa) o de retroceso (6 con pendiente negativa significativa) en el área de estudio. Es necesario agregar que algunos tramos del área de estudio se encuentran altamente influenciados por acciones de manejo con alimentación artificial, y con estructuras de protección y estabilización de la línea de costa, que se superponen a los procesos naturales e imponen limitaciones y cuidados al uso de los resultados encontrados.

El parámetro de forma A en el modelo de Dean obtenido de la regresión de perfiles promedio recoge consistentemente la heterogeneidad espacial observada en los perfiles promedio y de forma similar los cambios observados en las temporadas climáticas. Durante la temporada de nortes, el valor promedio de A fue de -0.1408 modelando un perfil suave que durante la temporada de ondas tropicales mostró un valor promedio de 0.1534 para un perfil de mayor pendiente. Sin embargo, este

modelo se aparta de las formas de los perfiles promedio, mostrando diferencias importantes al no reproducir la caída relativamente abrupta al inicio y el posterior suavizamiento del perfil, en este sentido se propone trabajar en identificar el modelo que mejor represente el comportamiento de la zona.

Las características de las playas estudiadas se tipificaron como playas intermedias a reflectivas de acuerdo al parámetro Ω (Benedet *et al.*, 2004a), por el tamaño de sedimento, la forma y dimensiones del perfil promedio, así como la pendiente de playa. En concordancia con lo descrito por Benedet *et al.*, (2004a) en relación a la variabilidad del parámetro Ω , los valores en una misma playa variaron en el tiempo del dominio intermedio hacia valores cercanos al dominio reflectivo. Lo anterior nos muestra que cambios en el clima de oleaje modifica el comportamiento de la playa y alerta sobre las precauciones para darle uso como un descriptor morfodinámico de naturaleza estática.

Entre los descriptores morfodinámicos empleados, la tendencia de la posición de la línea de costa, expresada como la tasa de avance o retroceso en combinación con el ancho de playa, puede generar un criterio que permita tipificar las playas en diferentes niveles de seguridad. En la figura 12 se observa que las playas con extensión mayor a 60m (distancia de seguridad del decreto 801 del Estado de Yucatán) y con una tendencia a progradar se consideran de alta seguridad, tal como el sitio A1. El caso opuesto son aquellas playas de baja seguridad cuya extensión es menor a 20m (dentro de la zona federal) y con una tendencia a retroceder, como sucede en los sitios A4 y C4. Asimismo es posible proponer playas de seguridad

intermedia, donde su extensión es mayor a los 20m pero menor a los 60m. En estos casos podemos encontrar playas con una tendencia a progradar, o bien, a retroceder, en cuyo caso serían candidatas para realizar intervenciones de manejo.

Esta integración de conceptos sobre geomorfología, modelos de perfiles de equilibrio e indicadores morfodinámicos a través de la determinación de características de cobertura costera, características granulométricas, formas topográficas y de las condiciones de oleaje pueden contribuir en las decisiones de procesos de alimentación de playa, así como para establecer políticas en regulación del desarrollo de la costa que permita tanto conservar los sistemas de playa como proteger los bienes e infraestructura en el largo plazo.

Se considera necesario contar con un programa de monitoreo que alerte sobre las tendencias dramáticas en zonas de playa vulnerables que ponga en riesgo a la población o a su infraestructura.

Dada la importancia del área de playas del estado y su desarrollo, es también necesario promover estudios en el tema de hidrodinámica costera y estudios de modelación con ajustes y validación local, ya que las playas carbonatadas del estado presentan características *sui generis* por el tipo de plataforma así como las características del material sedimentario en su composición, forma y origen.

LITERATURA CITADA

- Appendini C.M., P. Salles, E.T. Mendoza, J. López, and A. Torres-Freyermuth. 2012. Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*. 28(6): 1404 – 1417.
- Azuz-Adeath, I. 1995. Predictive application of the convolution method for time-dependent beach profile response in one Mexican bay. *Proc. Int. Conf. 'Coastal Change 95'* Bordenmer-IOC, Bordeaux, 1995. 204-216.
- Bakri, Dhia Al. 1996. A geomorphological approach to sustainable planning and management of the coastal zone of Kuwait. *Geomorphology*. 17(4), 323-337.
- Bannister, A., S. Raymond y R. Baker. 2002. *Técnicas Modernas en Topografía*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México, D.F. 550p.
- Barredo, J.I. 1996. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*. RA-MA Editorial. 264p.
- Barrera Ceballos, M.A. 2001. Deformación en la línea de 1 kilómetro de playa comprendido entre las comisarías de Chelem y Chuburná Puerto. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. Tesis de ingeniero civil. 98p.

Benedet, L., Finkl, C.W., Campbell y T, Klein, A. 2004a. Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment Coastal Engineering. 51, 839-861.

Benedet, L., C.W. Finkl, A.H.F. Klein. 2004b. Morphodynamic classification of beach on the Atlantic coast of Florida: Geographical variability of beach type, beach safety and Coastal Hazards. Journal of Coastal Research. Special Issue 39. Proceeding of the 8th International Coastal Symposium, Itajai, SC Brazil.

Bernabeu, A.M., R. Medina, y C. Vidal. 2003. Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile. Estuarine Coastal and Shelf Science. 57. 577-585.

Bird, E. 2000. Coastal Geomorphology. An Introduction. John Wiley & Sons Ltd., The Atrium Gate, Chichester, Inglaterra. 321p.

Bruun, P. 1954. Coastal erosion and development of beach profiles. U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum 44, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.

Burrough, P.A.y R.A. McDonnell. 1998. Principle of Geographical Information Systems. Oxford University Press Inc., New York. 333p.

- Capobianco, M., H. Hanson, M. Larson, H. Steetzel, M.J.F. Stive, Y. Chatelus, S. Aarninkhof, T. Karambas. 2002. Nourishment design and evaluation: Applicability of model concept. *Coastal Engineering*. 47. 113-135.
- Catto N., K. MacQuarrie and M. Hermann 2002. Geomorphic response to Late Holocene climate variation and anthropogenic pressure, northeastern Prince Edward Island, Canada. *Quaternary International*. Vol. 87, 1: 101-117.
- Clark, J. R. 1996. *Coastal Zone Management Handbook*. CRC Marine Science Series, Boca Raton: CRC Press.
- Compton, R.R. 1985. *Geology in the Field*. John Wiley & Sons, Inc. 398p.
- Curtis, J.H. y D.A. Hodell. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya Cultural Evolution. *Quaternary Research*. 46. 37-47.
- Data Tur, 2012. *Data Tur, Certeza Estratégica*. Secretaría de Turismo, Gobierno de México. Consulta 26 de Abril de 2013, última actualización 14 de abril de 2013. En: <http://datatur.sectur.gob.mx>
- Dean, R.G. 1977. *Equilibrium beach profile: US Atlantic and Gulf Coasts*, Department of Civil Engineering. Ocean Engineering Report No. 12. University of Delaware, Newark Delaware.

Dean, R.G. y R.A. Dalrymple, 2002. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press. 475p.

Eastman, J.R. 1995, Idrisi for Windows, User's Guide. Clark University.

Falqués, A. 2006. Wave driven alongshore sediment transport and stability of the Dutch coastline. Coastal Engineering. Vol.53, 2-3: 243-254.

Ferreira O., T. Garcia, A. Matias, R. Taborda, J. A. Dias. 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. Continental Shelf Research. Vol. 26, 9: 1030–1044.

Finkl, C.W. 2004. Coastal Classification: Systematic Approaches to Consider in the Development of a Comprehensive Scheme. Journal of Coastal Research. 20 (1). 166-213.

Folk, R.L. 1966. A review of grain-size parameters. Sedimentology. 6, 73-93.

Forbes, D. L., G. S. Parkes, G. K. Manson y L. A. Ketch. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. Marine Geology. 210. 169–204.

French, P.W. 2001. Coastal Defences. Processes, problems and solutions. Routledge, Taylor and Francis Group. New Cork. 366p.

Goldsmith, V. 1989. Coastal sand dunes as geomorphic system. Proceedings, Royal society of Edinburgh, B96: 3-15.

Hanson, H. 1989. Genesis - A generalized shoreline change numerical model. Journal of Coastal Research. 5 (1). 1-27.

Hobbs, C.H., 2012. The Beach Book. Science of the Shore. Columbia University Press. 195p.

Hooke, J. Bray y M. Carter, D. 1995. Sediment transport. sea level rise and shoreline management: Advising decision makers on the south coast of England. Proc. Int. Conf. 'Coastal Change 95' Bordomer-IOC, Bordeaux, 1995. p. 978.

Jaimes de la Cruz, B. 1995. Modelo Numérico Cuasi Tridimensional para la Evolución de la Zona Costera. Tesis Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Kamphius, J.W. 2010. Introduction to Coastal Engineering and Management. 2nd. Ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 525p.

Komar, P.D. 1995. Coastal processes and the susceptibilities of properties to erosion. Proc. Int. Conf. 'Coastal Change 95' Bordomer-IOC, Bordeaux, 1995. 183-200.

Komar P.H. y Gaughan M.K. 1972. Airy wave theory and breaker height prediction. Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 405-418 pp.

Larson, M. 1991. Equilibrium profile of a beach with varying grain size. Proceeding of Coastal Sediments. Vol. II, ASCE, New Cork. 905-919.

Larson M. y N.C. Kraus. 1989. SBEACH. Numerical model for Simulating Storm Induced Beach Change. CERC Technical report 89-9, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, 17p.

Larson, M. 1988. "Quantification of beach profile change". Report 1008. Dept. of Water Resources Engineering, Lund University, Institute of Science and Technology.

Lillesand, T.M. y R.W. Kiefer. 1987. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, U.S.A. 721p.

Logan, B.W., J.L. Harding, W.M. Austin, J.D. Williams y R.G. Snelter. 1969. Carbonate Sediments on reefs, Yucatan shelf, Mexico. Part I. Late Quaternary Sediments. Mem. Am.Assoc. Petrol. Geol. 11. 1-128.

Mendoza Grande, M. 2004. Modelos Numéricos en Ingeniería Portuaria y Costera. Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales. Secretaría de

Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano de Transporte. División de Ingeniería de Puertos y Costas.

Meyer-Arendt, K.J. 1993. Shoreline changes along the North Yucatan Coast. In Coastlines of the Gulf of Mexico (S. Laska & A. Puffer, eds.) American Society of Civil Engineers, New York. Proceedings of the Eight Symposium on the Coastal and Ocean Management (Coastal Zone '93), July 19-23, New Orleans, 103-117.

Meyer-Arendt, K.J., 1991. Tourism on the North Yucatan Coast: Human Response to Shoreline Erosion and Hurricanes. *Geojournal* 23(4): 327-336.

Mwakumanya, A.M., Munyao, T.M. y Ucakuwun, E.K. 2009. Beach width analyses in beach erosion hazard assessment and management at Bamburi beach, Mombasa, Kenya. *Journal of Geography*. 2 (12), 299-309.

Nolasco-Montero, E. y A. Carranza-Edwards, 1988. Estudio sedimentológico regional de playas de Yucatán y Quintana Roo, México. *An. Inst. del Mar y Limnol. Univ. Autom. México*, 15(2): 49-66.

Open University, 1989. *Waves, Tides, and Shallow-water Processes*. The Open University and Butterworth-Heinemann. Oxford. 227p.

Oropeza-Orozco O, I. Sommer-Cervantes, J. Carlos-Gómez b, J. C. Preciado-López, M. A. Ortiz-Perez y J. Lopez-Portillo. 2011. Assessment of Vulnerability and Integrated Management of Coastal Dunes in Veracruz, Mexico. *Coastal Management*. 39(5): 492-514.

Pettijohn, F.J., P.E. Potter y R. Siever, 1972. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag. Berlin. 618 p.

Pilkey, O.H. 1998. Everything I've wanted to say about the predictive models used for engineering design of nourished beaches. *Coastal zone Canada "94", cooperation in the coastal zone: conference proceedings*. Aug. 30 - Sept . 1998. Victoria B.C. 39-44.

Prasad, R.S. y I.A. Svendsen. 2003. Moving shoreline boundary condition for nearshore models. *Coastal Engineering*. 49. 239-261.

Reeve, D., A. Chadwick and C. Fleming. 2004. *Coastal Engineering. Processes, theory and design practice*. Spon Press, Taylor & Francis Group. New York. 460p.

Reyes M. En preparación. *Mareas en el litoral noroeste de la Península de Yucatán*. Tesis del programa doctoral del Centro de Investigación y estudios Avanzados, Unidad Mérida.

Secretaría de Turismo, 2013. Sexto informe de labores. Secretaría de Turismo, Gobierno de México. Recuperado el 26 de Abril de 2013 en: www.sectur.gob.mx

Short, A.D., 1999. Beaches. In: Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Edited by A.D. Short. John Wiley and Sons. West Sussex, England. 3-20.

Thywissen, K. 2006. Components of Risk. A comparative glossary. Studies Of The University: Research, Counsel, Education – Publication Series of UNU-EHS, Boon Germany. No. 248p.

Toledano V., N. y R. Silva C. 2005. Modelación de perfiles de playa en presencia de diques arrecife. Memorias del V Congreso de Desarrollo Sustentable, del 24 al 25 de noviembre de 2005 en Veracruz, Veracruz, México.

Turner, RK, WN Adger y I Lorenzoni, 1998. Toward Integrated Modelling and Analysis in Coastal Zones: Principles and Practices, LOICZ report & studies No.11, iv, 122p. Texel, The Netherlands.

UN. 1992. Agenda 21. On line, www.rolac.unep.mx/agenda21/esp/ag21inde.htm. Activo, diciembre 2004.

USACE. 1984. Shore Protection Manual. U.S. Army.

van den Berg, N., A. Falqués and F. Ribas. 2011. Long-term evolution of nourished beaches under high angle wave conditions. *Journal of Marine Systems*. Vol. 88, 1: 102-112.

Wang, P. y N.C. Kraus. 1999. Long sediment transport rate measured by short-term impoundment. *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering*. 125 (3), 118-126.

Work, A.P. y Dean, R.G. 1991. Effect of varying sediment size on equilibrium beach profiles. *Proceeding of Coastal Sediments*. Vol. II, ASCE, New York. 898-904.